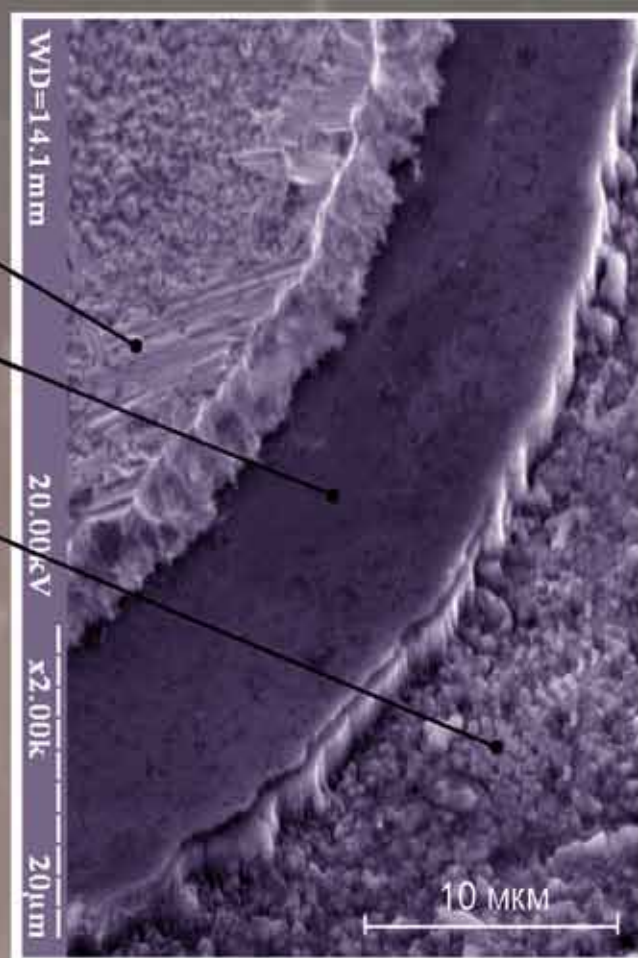
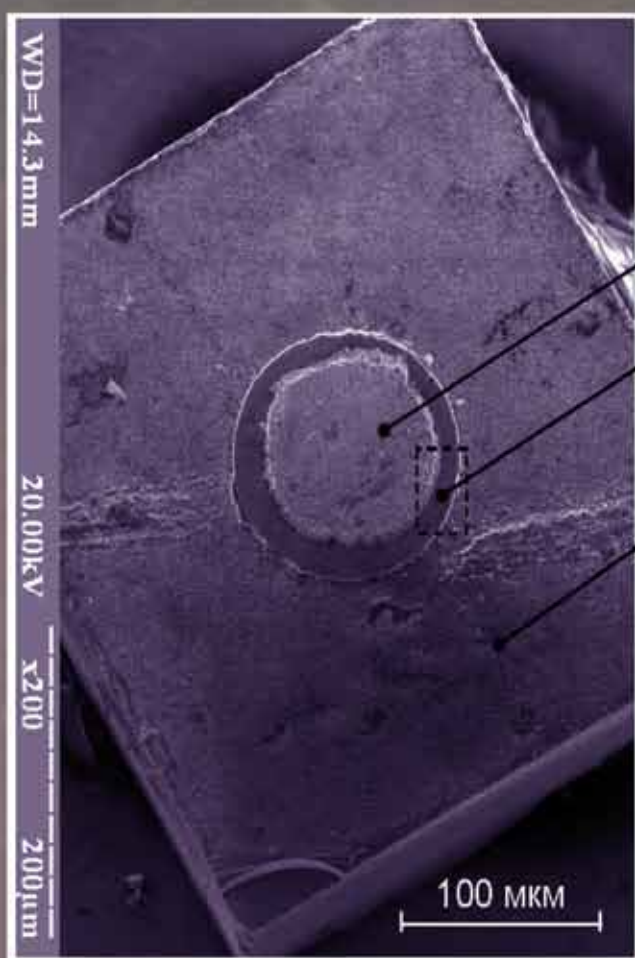


Технология и конструирование в электронной аппаратуре



К статье «Формирование мезоструктур 4H-SiC p-i-n-диодов
методом ионно-плазменного травления»

5(83) 2009

ОДИНАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

17—21 мая 2010 года
Украина, г. Одесса

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

- Информационные технологии и системы искусственного интеллекта
- Компьютерные системы и сети
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии
- Проблемы экологического мониторинга и медицинской диагностики



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

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

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

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

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

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



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

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

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

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корещак.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 7,5+1,0. Уч.-изд. л. 10,3. Тираж 500 экз. Заказ № 195.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

УЧРЕДИТЕЛИ

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

Одобрено к печати Ученым советом ОНПУ
(Протокол № 2 от 27.10 2009 г.)

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Индуктивность, перестраиваемая электрическим полем. *Семёнов А. А., Усанов Д. А.* 3

Электронные средства: исследования, разработки

Гибридный автодинный сенсор магнитного резонанса. *Браиловский В. В., Верига А. Д., Политанский Л. Ф.* 7

Установка для измерения удельного коэффициента силы света материалов со световозвращающим эффектом. *Бутенко В. К., Добровольский Ю. Г., Шабашкевич Б. Г., Юрьев В. Г.* 10

Системы передачи и обработки сигналов

Оптимизация процесса поиска неизвестного количества движущихся объектов. *Гришин И. Ю.* 13

Сенсоэлектроника

Оптимизация конструкции мембранных датчиков. *Рубцевич И. И., Высоцкий В. Б., Ковальчук Н. С.* 16

Функциональная микро- и нанoeлектроника

Разработка схемы и топологии элементов матрицы управляемых автоэмиссионных кремниевых микрокатодов. *Дружинин А. А., Голота В. И., Козут И. Т., Ховерко Ю. Н.* 20

Вольт-фарадные измерения в тонкопленочных эпитаксиальных структурах GaAs. *Горев Н. Б., Коджеспинова И. Ф., Привалов Е. Н.* 25

Фотоприемники ультрафиолетового излучения на основе тонких пленок ZnS. *Бобренко Ю. Н., Ярошенко Н. В., Шереметова Г. И., Семикина Т. В., Атадаев Б. С.* 29

Измерения ВАХ импульсных кремниевых ЛПД на участке лавинного пробоя. *Кудрик Я. Я.* 32

Обеспечение тепловых режимов

Прогнозирование показателей надежности двухкаскадного термоэлектрического охлаждающего устройства в режиме $Q_{0\max}$. *Зайков В. П., Кинишова Л. А., Казанжи Л. Д., Храмова Л. Ф.* 34

Технологические процессы и оборудование

Корреляция параметров арсенид-галлиевых эпитаксиальных слоев и технологии их выращивания. *Каримов А. В., Ёдгорова Д. М., Якубов Э. Н.* 38

Исследование погрешности сопротивления тонкопленочного резистора. *Спирин В. Г.* 42

Формирование мезоструктур 4H-SiC $p-i-n$ -диодов методом ионно-плазменного травления. *Болтовец Н. С., Борисенко А. Г., Иванов В. Н., Федорович А. О., Кривуца В. А., Полозов Б. П.* 45

Материалы электроники

Наноструктурированная композитная пленка для сенсоров влажности. *Коваленко К. Л., Шаран Н. Н., Севастьянов В. В.* 49

Способ определения доли кристаллов в стеклокерамическом диэлектрике. *Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И.* 50

Метрология. Стандартизация

Малогабаритные цифровые частотомеры сверхвысокочастотного диапазона. *Криваль И. И., Скрипнюк А. И., Проценко В. А., Марьенко А. В.* 54

Библиография

Анотации к статьям номера 58

Новые книги 12, 15, 19, 28, 31, 48, 53, 57

В портфеле редакции 15

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

ЗМІСТ

Нові компоненти для електронної апаратури

Індуктивність, що перестроюється електричним полем. *Семенов А. А., Усанов Д. А.* (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Гібридний автодинний сенсор магнітного резонансу. *Брайловський В. В., Верига А. Д., Політанський Л. Ф.* (7)

Установка для вимірювання питомого коефіцієнта сили світла матеріалів зі світлоповертаючим ефектом. *Бутенко В. К., Добровольський Ю. Г., Шабашкевич Б. Г., Юр'єв В. Г.* (10)

Системи передавання та обробки сигналів

Оптимізація процесу пошуку невідомої кількості рухомих об'єктів. *Гришин І. Ю.* (13)

Сенсоелектроніка

Оптимізація конструкції мембранних датчиків. *Рубцевич І. І., Висоцький В. Б., Ковальчук Н. С.* (16)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Розробка схеми і топології елементів матриці керованих автоемісійних кремнієвих мікрокатодів. *Дружинін А. О., Голота В. І., Когут І. Т., Ховерко Ю. М.* (20)

Вольт-фарадні вимірювання в тонкоплівкових епітаксialних структурах GaAs. *Горев М. Б., Коджеспірова І. Ф., Привалов Є. М.* (25)

Фотоприймачи ультрафіолетового випромінювання на основі тонких плівок ZnS. *Бобренко Ю. М., Ярошенко М. В., Шереметова Р. І., Семікіна Т. В., Атаєв Б. С.* (29)

Вимірювання ВАХ імпульсних кремнієвих ЛПД на ділянці лавинного пробою. *Кудрик Я. Я.* (32)

Забезпечення теплових режимів

Прогнозування показників надійності двохкаскадного термоелектричного охолоджуючого пристрою в режимі Q_{0max} . *Зайков В. П., Киншова Л. А., Казанжі Л. Д., Храмова Л. Ф.* (34)

Технологічні процеси та обладнання

Кореляція параметрів арсенід-галієвих епітаксialних шарів і технології їх вирощування. *Карімов А. В., Йодгорова Д. М., Якубов Е. Н.* (38)

Дослідження похибки опору тонкоплівкового резистора. *Спірін В. Г.* (42)

Формування мезаструктур 4HSiC $p-i-n$ -діодів методом іонно-плазмового травлення. *Болтовець М. С., Борисенко А. Г., Іванов В. М., Федорович А. О., Кривуца В. А., Полозов Б. П.* (45)

Матеріали електроніки

Наноструктурована композитна плівка для сенсорів вологості. *Коваленко К. Л., Шаран М. М., Севастьянов В. В.* (49)

Спосіб визначення частки кристалів у склокерамічному діелектрику. *Дмитрієв М. В., Єрмічов І. М., Панов Л. І.* (50)

Метрологія. Стандартизація

Малогабаритні цифрові частотоміри надвисокочастотного діапазону. *Криваль І. І., Скрипнюк О. І., Проценко В. О., Мар'єнко А. В.* (54)

CONTENT

New components for the electronic equipment

Electrical field controlled inductance. *Semenov A. A., Usanov D. A.* (3)

Electronic means: investigations, development

Hybrid autodyne sensor of a magnetic resonance. *Brajilovskiy V. V., Veriga A. D., Politanskij L. F.* (7)

The installation for measuring of specific coefficient of force light materials with turn of light effect. *Butenko V. K., Dobrovolskiy Yu. G., Shabashcevic B. G., Yuriev V. G.* (10)

Systems of transfer and processing of signals

Search process optimization of unknown amount of train objects. *Grishin I. Yu.* (13)

Sensoelectronics

The optimization of design of the membrane sensor. *Rubcevic I. I., Wysotsky V. B., Kovalchuk N. S.* (16)

Functional micro- and nanoelectronics

Development of the circuit and layout of elements of an operated field emission silicon microcathodes matrix. *Druzhinin A. A., Holota V. I., Kogut I. T., Khoverko Ju. M.* (20)

Capacitance-voltage measurements in GaAs thin-film epitaxial structures. *Gorev N. B., Kodzhespriova I. F., Privalov E. N.* (25)

Ultraviolet photosensors based on ZnS thin films. *Bobrenko Yu. N., Yaroshenko N. V., Sheremetova G. I., Semikina T. V., Atdaev B. S.* (29)

The measurements of pulsed I-V-curves for silicon IMPATT diodes in the avalanche breakdown region. *Kudryk Ya. Ya.* (32)

Ensuring of thermal modes

Forecasting of parameters of reliability two-cascade thermoelectrical cooling device in a mode Q_{0max} . *Zaykov V. P., Kinshova L. A., Kazanji L. D., Khramova L. F.* (34)

Technological processes and equipment

The correlation between parameters of gallium arsenic epitaxy layers and technology of growth's process. *Karimov A. V., Yodgorova D. M., Yakubov E. N.* (38)

Study of thin-film resistor resistance error. *Spirin V. G.* (42)

Forming of 4HSiC $p-i-n$ -diodes mesastructures by the ion-plasmas etching method. *Boltovets M. S., Borisenko A. G., Ivanov V. N., Fedorovich A. O., Krivutsa V. A., Polozov B. P.* (45)

Materials of electronics

Nanostructure composite film for sensor controls of humidity. *Kovalenko K. L., Sharan N. N., Sevastyanov V. V.* (49)

Method of determining of crystal part in glass-ceramic dielectric. *Dmitriev M. V., Yermichoy I. N., Panov L. I.* (50)

Metrology. Standartization

Small size digital frequency counters of high-frequency range. *Krival I. I., Skrypnjuk A. I., Protsenko V. A., Marjenko A. V.* (54)

К. ф.-м. н. А. А. СЕМЁНОВ, д. ф.-м. н. Д. А. УСАНОВ

Россия, Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского
E-mail: semenovaa@info.sgu.ru

Дата поступления в редакцию
14.10 2009 г.

Перепечатано из журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»,
№ 4, 2009 г.

ИНДУКТИВНОСТЬ, ПЕРЕСТРАИВАЕМАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Показана возможность создания миниатюрного пассивного индуктивного элемента, перестраиваемого под воздействием электрического поля. Даны рекомендации по практическому применению индуктивных элементов предлагаемой конструкции.

Катушка индуктивности является одним из распространенных пассивных элементов, используемых при создании различных электронных схем. Специфика применения катушки в современных электронных приборах с высокой степенью интеграции заключается в том, что она плохо поддается как миниатюризации, так и реализации в интегральном исполнении. В отличие от резисторов и конденсаторов, выполняемых в виде участков полупроводникового кристалла с заданной проводимостью и обратносмещенных $p-n$ -переходов, катушки индуктивности реализуют либо схемотехнически в виде их гираторных аналогов [1, с. 252], либо в форме плоских спиралей или отрезков передающих линий методами планарной и гибридно-интегральной технологий [2]. Гираторы, представляющие собой по сути активные схемы электронных усилителей с выраженными частотно-зависимыми характеристиками, используются в диапазоне сравнительно низких частот и применяются, в основном, в частотно-избирательных схемах различных фильтров. Катушки, выполненные как в форме плоской спирали или отрезков передающих линий, так и в ином миниатюрном исполнении [3], успешно применяются в ВЧ- и СВЧ-диапазоне, но имеют общий недостаток, заключающийся в том, что изменение значения их индуктивности возможно преимущественно механическим способом.

Для достаточно длинного соленоида длиной l и площадью сечения витка S с общим числом витков N индуктивность равна

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l} = \mu_0 \mu n^2 V,$$

где μ_0 — магнитная постоянная;
 μ — относительная магнитная проницаемость среды;
 n — число витков на единицу длины, $n = N/l$;
 V — объем соленоида, $V = Sl$.

Отметим, что значение индуктивности прямо пропорционально квадрату числа витков, занимаемому

объему и магнитной проницаемости среды. Формулы для вычисления индуктивности катушек другой формы более сложны и могут не иметь аналитического вида, но основные пропорции для указанных параметров сохраняются. Изменение этих параметров традиционно используют для управления величиной индуктивности путем механической перестройки катушки (переключения секций катушки, изменения взаимного расположения витков, введения в катушку сердечника, выполненного из магнетика). Переключение секций катушки посредством интегрального коммутатора позволяет управлять значением индуктивности электронным способом, но параметр катушки при этом можно изменять лишь дискретно. Известен способ электронного управления индуктивностью, заключающийся в подмагничивании ферромагнитного сердечника катушки [4]. Однако при этом в конструкцию катушки вводится дополнительная подмагничивающая обмотка, что не способствует миниатюризации изделия в целом.

Предлагаемый в настоящей работе способ электронного управления индуктивностью пассивной катушки заключается во введении в ее конструкцию специфического сердечника, свойства которого изменяются под воздействием приложенного электрического поля, оказывая при этом влияние на индуктивность. В качестве такого сердечника используется кремниевая структура $n-i-p-i-n$ -типа, обладающая протяженными i -областями.

Если объект помещается внутрь катушки, то первичное переменное магнитное поле вызывает в нем вихревые токи. Электромагнитное поле катушки при этом изменится под действием поля вихревых токов. Это изменение поля вызывает такой эффект, какой получился бы, если изменить характеристики самой катушки. Анализ изменения свойств катушки под влиянием объекта, особенно если он имеет неоднородную структуру и параметры, изменяющиеся под воздействием внешнего смещения [5, с. 186—189], чрезвычайно сложен.

В общем случае на индуктивность оказывают влияние физические характеристики материала объекта — электрические и магнитные свойства, определяемые его составом и структурой: электропроводность, магнитная проницаемость, геометрические размеры, наличие неоднородностей [5; 6, с. 293].

Для проверки возможности создания индуктивного элемента с электронной перестройкой изготов-

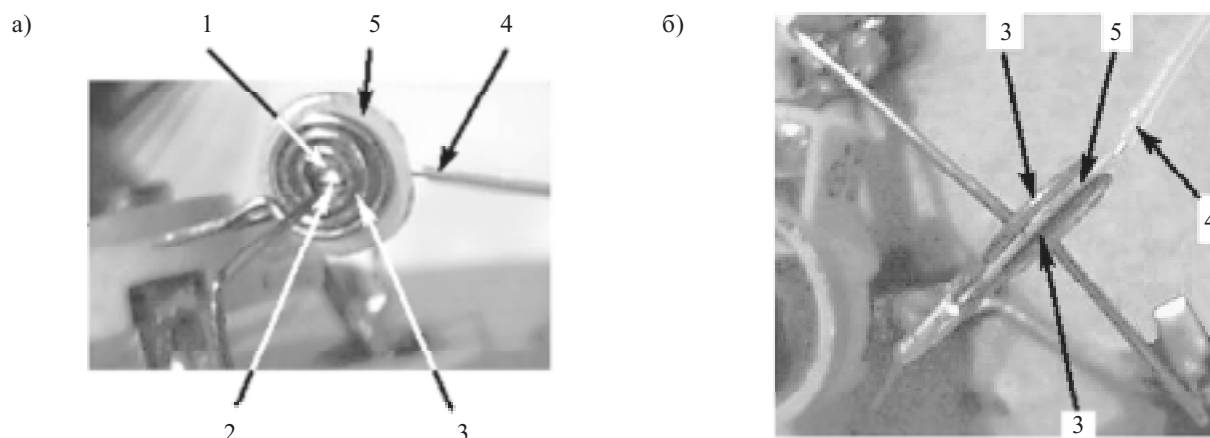


Рис. 1. Конструкция катушки индуктивности, перестраиваемой электрическим полем:
а — вид сбоку; б — вид сверху

лена двухсекционная катушка (рис. 1), сердечник 1 которой представляет собой кремниевую $n-i-p-i-n$ -структуру с толщиной i -областей 200 мкм. В качестве такой структуры использовался выпускаемый промышленностью бескорпусный диод типа 2A505, конструктивно объединяющий в себе две $p-i-n$ -структуры с общей p -областью, имеющей гибкий соединительный вывод. Контакты n -областей диода 2 имеют вид металлических площадок из материала с хорошей проводимостью. Диод, длина которого вместе с контактами составляет $\approx 0,8$ мм, размещался между двумя секциями катушки 3, намотанными виток к витку в форме плоской спирали на оправке диаметром 0,9 мм, причем изолированный вывод p -области 4 пропусклся наружу между плоскостями секций, а $p-i-n$ -структуры заполняли области внутри секций. Сам диод центрировался по оси катушки с помощью тонкой изолирующей диэлектрической прокладки 5.

Обе секции содержали по три витка медного провода в лаковой изоляции диаметром 0,5 мм. Элек-

трический контакт с n -областями диода осуществлялся с помощью прижимных графитовых электродов 6, не оказывающих влияния на индуктивность катушки (рис. 2).

Таким образом, магнитное поле изготовленной катушки сосредоточено во внутреннем объеме секций, преобладающую часть которого занимали протяженные i -области (базы) диода, размер которых значительно превышал размеры p - и n -областей. В отсутствие прямого смещения базовые области $p-i-n$ -структур представляют собой по сути диэлектрик с магнитной проницаемостью $\mu=1$.

Добротность катушки при введении в нее $n-i-p-i-n$ -структуры без смещения снижалась на 15—18%, значение индуктивности уменьшалось на величину порядка 0,5%.

При подаче на $p-i-n$ -диод напряжения прямого смещения происходит процесс инжекции носителей заряда в высокоомную i -область диода, в результате чего концентрация носителей заряда в базе возрастает на несколько порядков и, соответственно, увеличивается проводимость базы [7, 8]. В таком случае говорят, что база диода «заливается» носителями заряда или «металлизируется».

Диод, находящийся в магнитном поле исследуемой катушки индуктивности, представляет собой объект, проводимость которого изменяется в широком диапазоне в зависимости от величины приложенного напряжения.

Зависимость параметров катушки от величины напряжения прямого смещения, прикладываемого к $n-i-p-i-n$ -структуре, выполняющей роль управляемого электрическим полем сердечника, исследовалась с помощью измерителя добротности (Q -метра) типа Е4-11, позволяющего определить резонансным методом как значение индуктивности, так и величину потерь.

Из приведенных на рис. 3 зависимостей добротности Q и индуктивности L исследуемой катушки от напряжения смещения U видно, что добротность начинает заметно снижаться непосредственно с появлением тока через $n-i-p-i-n$ -структуру.

Уменьшение добротности с ростом приложенного к $n-i-p-i-n$ -структуре напряжения может быть

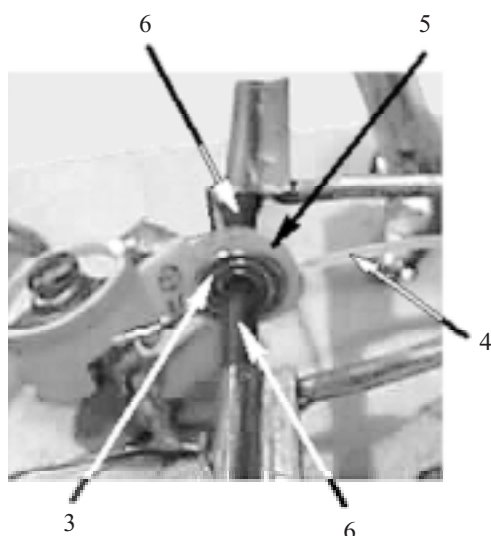


Рис. 2. Внешний вид катушки индуктивности с подключенными угольными контактными прижимными электродами

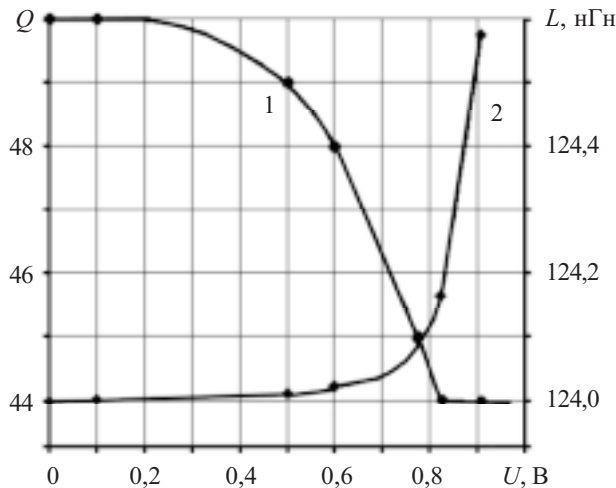


Рис. 3. Экспериментальные зависимости добротности (1) и индуктивности (2) исследуемой катушки от величины напряжения смещения

объяснено увеличением мощности потерь, связанным с ростом числа инжектированных носителей заряда. Наблюдающийся участок «насыщения» на зависимости Q от U может быть объяснен возрастанием токов «утечки» через переходы при высоком напряжении смещения на переходах и связанным с этим уменьшением уровня инжекции носителей заряда через переходы.

Форма графика зависимости индуктивности катушки от напряжения смещения обнаруживает сходство с ВАХ $p-i-n$ -структуры, что позволяет предположить пропорциональность изменения величины индуктивности значению проходящего через структуру тока.

Следует отметить, что обнаруженный эффект в значительной мере зависит от соотношения геометрических размеров катушки и $n-i-p-i-n$ -структуры. Так, при диаметре намоточного провода 1 мм зависимость индуктивности от напряжения смещения выражена весьма слабо. Большое значение имеет также выбор конкретного экземпляра $n-i-p-i-n$ -структуры. Как показала практика, диоды имеют значительный разброс характеристик в пределах партии, причем возможна заметная неидентичность характеристик $p-i-n$ -диодов отдельно выбранной $n-i-p-i-n$ -структуры. Не последнюю роль, оказывающую влияние на величину как индуктивности, так и добротности, играет качество изготовления самой катушки.

В связи с этим для изготовления управляемой катушки индуктивности можно рекомендовать материалы, обладающие хорошей проводимостью, что повысит начальное значение добротности и позволит выбрать диаметр намоточного провода, сравнимый с размерами i -областей диода. Геометрия индуктивного элемента определяется преимущественно размерами используемого диода и должна обеспечивать концентрацию магнитного поля катушки в объеме $p-i-n$ -структуры.

С целью исследования возможности практического применения предложенного электронного эле-

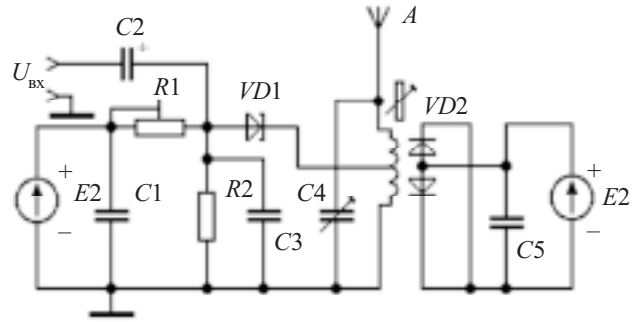


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема УКВ ЧМ-радиопередатчика, в резонансном контуре которого используется катушка индуктивности предложенной конструкции

мента сконструирован простой маломощный УКВ ЧМ-радиопередатчик вещательного диапазона частот 88—108 МГц (FM2) [9, 10], в резонансном контуре которого применена катушка индуктивности описанной выше конструкции. Принципиальная электрическая схема разработанного устройства приведена на рис. 4.

ЭДС источника питания $E1$ и включенный параллельно источнику резистивный делитель напряжения $R1, R2$ определяют положение рабочей точки на ВАХ туннельного диода $VD1$, при котором возникает устойчивая высокочастотная генерация, причем резистор $R2$ определял величину внутреннего сопротивления цепи питания диода, в связи с чем его номинал был выбран достаточно малым. Конденсатор $C3$, включенный параллельно нижнему плечу делителя $R1, R2$, образовывал фильтр цепи питания туннельного диода, а емкость $C1$ осуществляла блокировку источника питания $E1$ по высокой частоте.

Катушка индуктивности L и включенный параллельно ей конденсатор $C4$ представляли собой колебательный контур, резонансная характеристика которого определяла частоту ВЧ-несущей передатчика. Для согласования величины отрицательного дифференциального сопротивления туннельного диода с сопротивлением потерь контура, а также с целью уменьшения влияния активного элемента на резонансные характеристики было применено частичное подключение диода к контуру генератора, что не вызвало конструктивных трудностей, поскольку управляемая катушка L , намотанная поверх $n-i-p-i-n$ -структуры ($VD2$), имела две секции с общим отводом (см. рис. 1). Триммер $C4$ позволял осуществлять предварительную настройку передатчика на частоту диапазона FM2, не занятую вещательной станцией.

Через разделительную емкость $C2$ в схему передатчика подавался низкочастотный синусоидальный модулирующий сигнал $U_{вх}$ от звукового генератора типа ГЗ-112, причем амплитуда сигнала подбиралась по минимуму искажений синусоиды на выходе приемника. Низкочастотный сигнал $U_{вх}$, складываясь с постоянным смещением в цепи питания диода, приводил к изменению положения рабочей точки на падающем участке ВАХ туннельного диода, что вызывало девиацию частоты высокочастотного генерато-

ра и, соответственно, частотную модуляцию ВЧ-несущей, излучаемой штыревой антенной *A*.

Диод *VD2* представлял собой *n-i-p-i-n*-структуру типа 2A505, его питание осуществлялось от отдельного источника ЭДС *E2* типа Б5-43, гальванически не связанного со схемой передатчика. Конденсатор *C5* емкостью 47 нФ блокировал источник питания *E2* по высокой частоте. В качестве активного элемента передатчика был использован туннельный диод типа АИ101, остальные элементы схемы имели следующие номиналы: $R1=220\ \text{Ом}$, $R2=20\ \text{Ом}$, $C1=68\ \text{нФ}$, $C2=10\ \text{мкФ}$, $C3=10\ \text{нФ}$, $C4$ от 8 до 30 пФ. Источник питания *E1* представлял собой гальванический элемент типа 373, ЭДС=1,2—1,5 В.

Прием частотно-модулированного сигнала осуществлялся приемником *NAIKO F28D*, имевшим опцию автоматического поиска станций и цифровой индикатор настройки на принимаемую станцию (встроенный частотомер).

При изменении напряжения источника питания *n-i-p-i-n*-структуры, управляющей перестройкой индуктивности *L*, в диапазоне 0—0,9 В несущая частота передатчика сдвигалась в среднем на 150 кГц в сторону уменьшения. Графики зависимостей несущей частоты и индуктивности от напряжения на различных участках диапазона (88, 89 и 90 МГц) приведены на рис. 5. Значения индуктивности рассчитаны по графику изменения частоты несущей, исходя из известной величины емкости контура, постоянной в каждом частотном диапазоне.

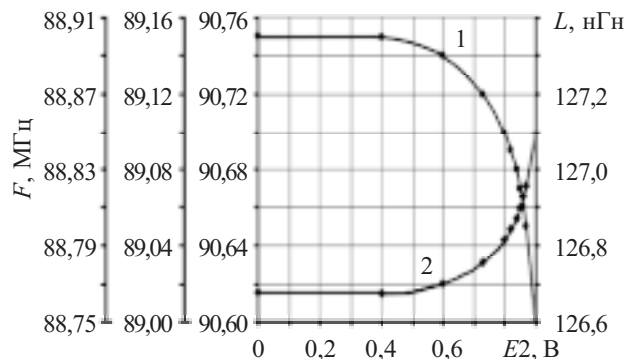


Рис. 5. Графики экспериментальных зависимостей несущей частоты (1) и индуктивности катушки (2) от напряжения

Поскольку источник питания имел дискретное управление с шагом 0,01 В, а разрешение индикатора частоты приемника составляло 0,01 МГц, измерения проводились следующим образом. Точное значение частоты выставлялось по индикатору, после чего передатчик перестраивался на эту частоту изменением величины напряжения смещения. Далее приемник включался в режим автопоиска сигнала передатчика, и если найденная частота отличалась от изначально выставленной, то она корректировалась подстройкой величины напряжения на *n-i-p-i-n*-структуре. После этого процесс повторялся до наиболее точного совпадения заданной частоты с частотой, определенной в режиме автопоиска. Поскольку в процессе поиска станции приемник подходит к несущей со сто-

роны низких частот, погрешность определения частоты носит систематический характер, вследствие чего общий вид зависимости можно считать достоверным, что подтвердилось при проведении измерений на разных участках диапазона.

Из полученного графика видно (см. рис. 5), что зависимость индуктивности от напряжения смещения на *n-i-p-i-n*-структуре хорошо коррелирует с аналогичной экспериментальной характеристикой катушки индуктивности (см. рис. 3), измеренной прибором Е4-11.

Диапазон изменения величины индуктивности можно весьма просто увеличить, изготовив многосекционную катушку, поскольку геометрия *n-i-p-i-n*-структуры позволяет это сделать без значительных конструктивных трудностей. Катушки индуктивности предложенной конструкции удобны для изготовления в планарной форме, когда витки формируются напылением или травлением материала поверхности вокруг *p-i-n*-структуры, расположенной в объеме. Несомненным преимуществом конструкции является также то, что цепь управления индуктивностью гальванически развязана от схемы, в которую катушка включена.

Таким образом, проведенные исследования показали, что катушка, выполненная на сердечнике, являющемся *p-i-n*-структурой с толстой базой, представляет собой индуктивный элемент, обладающий способностью к перестройке под воздействием потенциала, приложенного к выводам *p-i-n*-структуры. Это позволяет считать доказанной возможность создания миниатюрного пассивного индуктивного элемента, перестраиваемого под воздействием электрического поля. Катушки такого типа в качестве миниатюрных управляемых индуктивностей могут представлять интерес при конструировании современной радиоэлектронной аппаратуры, в схемах генераторов, модуляторов, фильтров, частотно-избирательных усилителей высокочастотного диапазона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т. 1. — М.: Мир, 1983.
2. Микроэлектронные устройства СВЧ / Г. И. Веселов, Е. Н. Егоров, Ю. Н. Алехин и др. — М.: Высш. шк., 1988.
3. Голубев И. Высококачественные индуктивные элементы компании ТОКО // Компоненты и технологии. — 2006. — № 1. — С. 14—16.
4. Шольц Н. Н., Пискарев К. А. Ферриты для радиочастот. — М.: Энергия, 1966.
5. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. Испытания и контроль качества материалов и конструкций. — М.: Высш. шк., 2004.
6. Баранов В. М., Карасевич А. М., Сарычев Г. А. Диагностики материалов и конструкций. — М.: Высш. шк., 2007.
7. Дзехцер Г. Б., Орлов О. С. *P-i-n*-диоды в широкополосных устройствах СВЧ. — М.: Сов. радио, 1970.
8. Вайсблат А. В. Коммутационные устройства на полупроводниковых диодах. — М.: Радио и связь, 1987.
9. Янчук Е. В. Туннельные диоды в приемно-усилительных устройствах. — М.: Энергия, 1967.
10. Морозов В. Некоторые схемы на туннельных диодах // Радио. — 1965. — № 4. — С. 37—39.

К. ф.-м. н. В. В. БРАЙЛОВСКИЙ, А. Д. ВЕРИГА,
д. т. н. Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ

Украина, Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича
E-mail: brailovsky@ukr.net, veriga@ukr.net

Дата поступления в редакцию
13.07 2009 г.

Оппонент д. т. н. С. М. СМОЛЬСКИЙ
(ИРЭ МЭИ, г. Москва)

ГИБРИДНЫЙ АВТОДИННЫЙ СЕНСОР МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Разработан автодинный сенсор, который позволяет проводить наблюдения геликонного резонанса однокатушечным методом и получать сигналы ЭПР, определять кинетические характеристики полупроводниковых материалов бесконтактным методом на частотах ~500 МГц в температурном диапазоне 77—300 К.

Автодины — автогенераторы слабых колебаний широко используются в радиоспектроскопии. Достаточно высокая чувствительность к изменению потерь в колебательном контуре позволяет использовать их для детектирования слабых сигналов методами ЯМР и ЯКР [1]. Кроме того, эти устройства с успехом могут использоваться для наблюдения размерных резонансов, в частности геликонов [2]. Использование размерных резонансов позволяет проводить измерение кинетических характеристик полупроводниковых материалов бесконтактным методом [3], что ускоряет процедуру измерения в сравнении с методом Холла, в том числе для тонкопленочных материалов, сформировать омические контакты для которых технически очень трудно.

Целью данной работы являлась разработка автодинного сенсора, позволяющего проводить наблюдения геликонного резонанса однокатушечным методом интерферометрии для бесконтактного определения кинетических характеристик полупроводниковых материалов. Практический интерес представляют измерения в области от азотной до комнатной температуры. При этом выдвигаются повышенные требования к обеспечению его верхней рабочей частоты (500 МГц) и к уровню его собственных шумов.

Для уменьшения влияния соединительной линии с эквивалентной емкостью C_3 на параметры колебательного контура схема разработанного автодина разделена на две части — одна находится при комнатной температуре, другая вынесена в рабочую зону [4], которая предусматривает наличие однородного магнитного поля определенной напряженности и поддержание низкой температуры для снижения уровня собственных шумов автодина (рис. 1). Взаимодействие контура с образцом приводит к изменению амплитуды высокочастотных колебаний, генерируемых автодинным сенсором. Огибающая (низкочастотный сигнал) выделяется из высокочастотного модулированного сигнала этим же автодинным сенсором в результате так называемого стокового детектирования [5]. Длина соединительной линии не оказывает ощутимого влия-

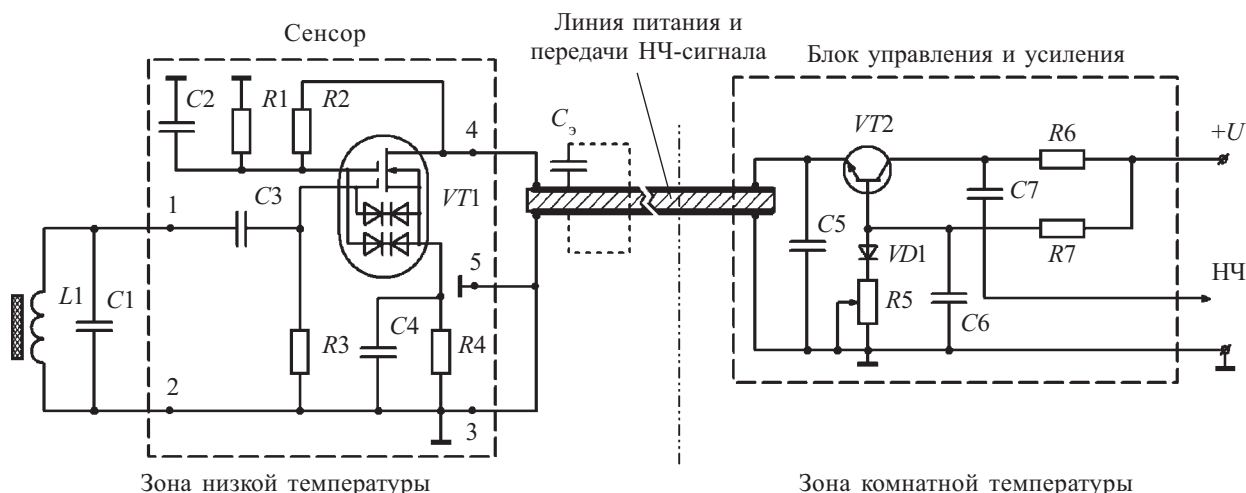


Рис. 1. Электрическая схема автодинного детектора [4]:

VT1 — BF998; VT2 — KT3107A; VD1 — КД522А; L1 — 0,1 мкГн; C2 — 1000 пФ; C3 — 3 пФ; C4 — 2 пФ; C5 — 10 нФ; C6 — 10 мкФ; C7 — 1 нФ; R1 — 47 кОм; R2 — 30 кОм; R3 — 100 кОм; R4 — 130 Ом; R5, R6 — 1 кОм; R7 — 2 кОм

ния на частотные свойства автодина, поскольку по ней передается только низкочастотный сигнал звукового диапазона.

Чувствительность автодина как датчика магнитного резонанса определяется прежде всего его шумовыми характеристиками, а они, в свою очередь, зависят от компонентной базы и режимов их работы. В случае объемных резисторов спектральная плотность флуктуаций напряжения растет пропорционально квадрату величины протекающего тока [6]. Уменьшить уровень собственных шумов автодина можно заменой объемных резисторов на пленочные металлические [7]. Тонкопленочные резисторы, в отличие от толстых пленок, характеризуются меньшим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), в некоторых случаях даже отрицательным (для металлов), что позволяет использовать их для работы в широком диапазоне температур, в том числе и отрицательных. Обеспечение работоспособности автодина в широком температурном диапазоне требует обеспечения малой теплоемкости всех его элементов и надежного теплового контакта между элементами схемы. Для этого автодинный сенсор был разработан в виде гибридной интегральной микросхемы (ГИМС).

Схема сенсора (см. рис. 1) содержит малое число элементов и компонентов, имеет малую мощность, поэтому ее можно выполнить одноуровневой тонкопленочной методом фотолитографии с использованием фоторезиста ФП-383. Размеры элементов фотошаблонов подбирались с учетом под травливания. Стравливание рисунка слоев осуществлялось химическим методом [8, 9], травители подбирались таким образом, чтобы обеспечивалось селективное травление материалов пленок.

Материал подложки необходимо выбирать согласно требованиям, которые выдвигаются к подложкам [10], а также учитывая специфические условия работы микросхемы. В нашем случае рабочий диапазон температур составляет 77—300 К, частота — 500 МГц, поэтому необходимо выбрать материал с хорошей теплопроводностью и малыми диэлектрическими потерями на высоких частотах, а также иметь в виду плоскостность и шероховатость подложки, от которых зависит точность изготовления пассивной части микросхемы.

Из-за низкой теплопроводности стеклянные или стеклокерамические подложки выбирать нецелесообразно. Анализ характеристик других материалов, которые могут использоваться при высоких частотах [11, 12], показал, что материалом подложки может служить поликор или бериллиевая керамика, обладающие высокими прочностью и теплопроводностью.

Бериллиевая керамика имеет в 200—250 раз большую теплопроводность, чем стекло, хорошую механическую прочность и химическую стойкость, но не находит широкого применения из-за высокого уровня токсичности. Поэтому для подложки был выбран керамический материал поликор А-995А толщиной 0,6 мм.

Поликор (поликристаллический корунд Al_2O_3) не уступает бериллиевой керамике по всем параметрам (кроме теплопроводности, которая у него на порядок

ниже), к тому же он не токсичен и имеет малую шероховатость. Неровности поликора по отношению к толщине наносимых пленок имеют приемлемую величину, так что полирование можно не применять. На такие платы возможна установка компонентов в микорпусах, предназначенных для поверхностного монтажа [13].

При расчете геометрических размеров элементов схемы задавали их конструктивные и технологические параметры [10, 14, 15]. Для резисторов это: номинальное сопротивление, относительная погрешность номинального сопротивления ($\gamma_R=10\text{—}20\%$), номинальная мощность (мощность, рассеиваемая на резисторах, согласно расчетам не превышает 0,3—1 мВт), рабочая температура ($T=77\text{ К}$); абсолютная погрешность изготовления ($\Delta l=\Delta b=10\text{ мкм}$), абсолютная погрешность совмещения фотошаблона ($\Delta_r=0,1\text{ мм}$), относительная погрешность удельного сопротивления ($\gamma_r=0,01$). Для конденсаторов это: номинальная емкость, рабочее напряжение (приняли 12 В); погрешность размеров обкладок ($\Delta L=\Delta B=0,05\text{ мм}$), погрешность совмещения фотошаблона с подложкой ($\Delta l_k=0,1\text{ мм}$).

По величине сопротивления резисторы разделили на две группы. Для высокоомных резисторов выбрали материал кермет К-50С, для низкоомного резистора — нихром, т. к. они характеризуются низким ТКС, низким коэффициентом временной нестабильности (старения), высокой адгезией к поверхности подложки и технологичностью. Такой выбор материалов позволяет формировать пленки резисторов и контактных площадок и подслоя для контактных площадок в едином технологическом цикле. К тому же, эти материалы имеют близкие по величине, но противоположные по знаку ТКС, поэтому при переходе от комнатной температуры к азотной влияние температуры на величину сопротивления в значительной степени будет скомпенсировано.

Таким образом была образована трехслойная структура. Для уменьшения паразитной индуктивности резисторов на высоких частотах они выполнялись в форме прямоугольника.

В схеме имеется два конденсатора малой емкости (2 и 3 пФ) и один — большой (1000 пФ). Конденсаторы малой емкости формируют на подложке из слоя проводника. Их емкость на 90% образована из паразитной емкости, обусловленной краевым эффектом. Результирующая диэлектрическая проницаемость диэлектрика такого конденсатора формируется за счет диэлектрической проницаемости подложки и защитного покрытия.

Для конденсатора емкостью 1000 пФ в качестве изолирующего слоя на периферии и диэлектрика между обкладками использован диоксид кремния, т. к. технология его напыления хорошо отработана, а воспроизводимость достаточно высока. С целью предотвращения возможного замыкания обкладок конденсатора в процессе формирования соединительных дорожек формирование конденсатора проводилось в два этапа. Сначала формировалась нижняя обкладка, потом диэлектрик и верхняя обкладка, образованная из двух слоев — диоксида кремния и алюминия. Такая последовательность исключает лишнее стравли-

Характеристики слоев микросхемы

Наименование слоя	Материал	Электрическая характеристика	Толщина, нм	Метод нанесения	Травитель
Резисторы высокоомные	Кермет К-50С	5000 Ом/□	100	Термическое напыление	HF:HCl:NH ₄ F:H ₂ O
Резистор низкоомный, подслой контактных площадок резисторов высокоомных	Нихром	300 Ом/□	40	Термическое напыление	HNO ₃
Контактные площадки резисторов высокоомных	Золото	—	10	Термическое напыление	HCl и HNO ₃
Нижняя обкладка конденсатора	Алюминий А99	—	200	Плазменное напыление: метод катодного распыления	NaOH
Диэлектрик конденсатора	Диоксид кремния	22000 пФ/см ²	200	Плазмохимическое осаждение	HF:NH ₄ F:H ₂ O
Верхняя обкладка конденсатора	Алюминий А99	—	200	Плазменное напыление: метод катодного распыления	NaOH
Проводники, контактные площадки	Медь	—	3000	Плазменное напыление: метод катодного распыления	CuCl ₃
Защитное покрытие					

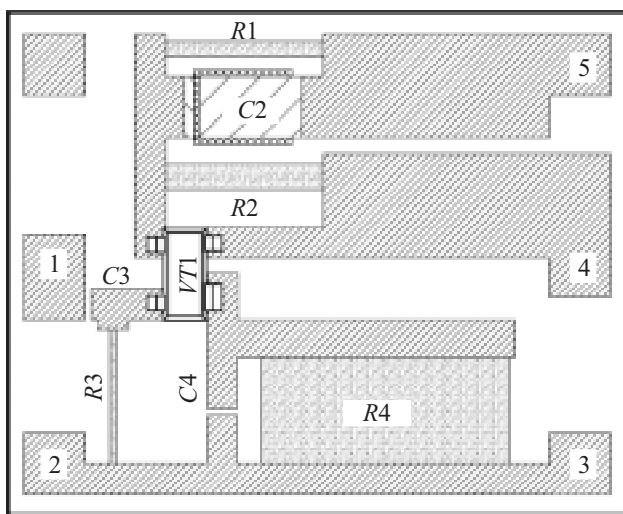


Рис. 2. Топология гибридной схемы:
1—5 — номера выводов (нумерация элементов соответствует схеме на рис. 1)

вание нижней обкладки (поскольку травитель для обеих один и тот же).

Монтаж транзистора осуществлялся по технологии SMD-монтажа. Пайку проводили припойной пастой SN62RM89AA-S85(Multicore) в соответствии с температурным профилем пайки, после чего выполняли термоциклирование [16].

С целью обеспечения надежности электрических контактов выводы микросхемы выполнялись с зажимом [10]. От влияния внешней среды ГИМС защищено покрытием из компаунда [17].

Топология предлагаемой гибридной схемы представлена на **рис. 2**. В **таблице** приведены характери-

стики материалов слоев, методы их нанесения и соответствующие селективные травители. Очередность нанесения слоев соответствует последовательности их представления в таблице.

Таким образом, спроектирована и изготовлена по тонкопленочной технологии гибридная интегральная микросхема автодинного сенсора на частоту 500 МГц с диапазоном рабочей температуры 77—300 К. Коэффициент шума такого автодина понизился на 2 дБ в сравнении с автодином, выполненном на дискретных элементах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ядерный магнитный резонанс / Под ред. П. М. Бородин. — Л.: Издательство ленинградского университета, 1982.
2. Хандожко А. Г., Слынько Е. И., Черныш И. П. Автодинный детектор для исследования ядерного магнитного резонанса и размерных эффектов в полупроводниках // Приборы и техника эксперимента. — 1988. — № 5. — С. 110—112.
3. Пожела Р. Ю., Толутис Р. Б., Эберсон Т. С. Бесконтактное измерение подвижности и концентрации носителей тока в полупроводниках // Приборы и техника эксперимента. — 1986. — № 1. — С. 185—187.
4. Пат. 41825 України. Автодинний детектор магнітного резонансу дециметрового діапазону / Браїловський В. В., Верига А. Д., Хандожко О. Г. — 2009. — Бюл. № 11.
5. Браїловський В. В., Верига А. Д., Хандожко О. Г. Ефективність стокового детектування в автодинному спин-детекторі // Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика. Електроніка. — 2004. — Вип. 201. — С. 110—112.
6. Головкин А. Г. Механизм возникновения шумовых максимумов в элементах с нелинейными вольт-амперными характеристиками // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 3. — С. 58—61.
7. www.km-cs.com/catalog/Catalog_Res.pdf

8. Черняев В. Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. — М.: Высш. школа, 1987.

9. Шмаков М., Паршин В. Школа производства ГПИС. Фото-литография. Третий этап — передача рисунка на материал интегральной микросхемы // Технологии в электронной промышленности. — 2007. — №5. — С. 72—77.

10. Березина А. С., Мочалкина О. Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. — М.: Радио и связь, 1983.

11. Кренделев А. Е. Технологические средства изготовления микрополосковых линий для ГИС КВЧ-диапазона // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. — 2002. — №4—5. — С. 34—39.

12. Акимов А. И. Керамические диэлектрики для высокочастотной техники // Сб. докл. междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела». — Белоруссия, г. Минск. — 2005. — С. 17—19. ([iftp.bas-net.by/files/ftt2005/1_17.pdf](http://ftp.bas-net.by/files/ftt2005/1_17.pdf))

13. Спирин В. Г. Перспективы развития тонкопленочных микросборок // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2005. — № 1. — С. 3—6.

14. Спирин В. Г. Компенсация систематических погрешностей тонкопленочных элементов через элементы фотошаблона // Там же. — 2004. — № 4. — С. 9—11.

15. Спирин В. Г. сопротивление контактов тонкопленочного резистора // Там же. — 2008. — № 5. — С. 20—23.

16. Шохин А. В. Типовой технологический процесс монтажа печатных плат с применением SMD-компонентов. — С.-Пб.: RAP, 2000.

17. Попова Г. Е. Использование эпоксидных компаундов для герметизации полупроводниковых приборов и микросхем. — М.: Энергия, 1985.

В. К. БУТЕНКО, к. т. н. Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ,
Б. Г. ШАБАШКЕВИЧ, В. Г. ЮРЬЕВ

Украина, г. Черновцы, НПФ «Тензор»
E-mail: chtentz@chv.ukrpack.net

Дата поступления в редакцию
07.09 2009 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Г. В. ПРОХОРОВ
(НПП «Сервис-Про», г. Черновцы)

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СИЛЫ СВЕТА МАТЕРИАЛОВ СО СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩИМ ЭФФЕКТОМ

В промышленности, бытовой технике, в производстве дорожных знаков, при пошиве спецодежды широко используются материалы со световозвращающим эффектом [1—4]. Согласно ДСТУ 4100-2002, эффективность таких материалов определяется удельным коэффициентом силы света световозвращающего материала K . Для его измерения существуют различные приборы, однако большинство из них предназначены для измерения так называемого коэффициента световозвращения, который не нормируется украинской нормативной документацией, либо не в полной мере отвечают требованиям [4].

Требования ДСТУ 4100-2002 предусматривают, что удельный коэффициент силы света световозвращающей поверхности дорожных знаков при угле отклонения $\alpha=20^\circ$ и угле освещения $\beta=5^\circ$ должен быть не меньше чем 50 кд/(лк·м²) для белого цвета, 35 — для желтого, 20 — для оранжевого, 10 — для красного, 7 — для зеленого и 2 кд/(лк·м²) для синего.

Среди известных приборов достаточно широко применяемых в странах СНГ, можно отметить приборы КС-ТЕСТ и КС-ТЕСТ-1, которые состоят из излучателя и фотоприемника, расположенных в одном корпусе пистолетного типа. Согласно паспортным данным, эти приборы предназначены для измерения коэффициента световозвращения дорожных знаков в диапазоне соответственно 1—100 и 1—300 кд/(лк·м²) [5]. Главный же недостаток этих приборов заключается в их неспособности измерять именно коэффициент силы света световозвращающих материалов. Кроме того, указанные приборы производят измерения без

учета углов наблюдения и освещения, как этого требует ДСТУ [4].

Также можно отметить рефлектометр дорожных знаков РДЗ, предназначенный для оперативного измерения коэффициента световозвращения материалов, в частности, в условиях производства [6], который состоит из источника света типа А (с цветной температурой 2854 К), фотоприемной головки, зарегистрированной под относительную спектральную световую эффективность монохроматического излучения для дневного зрения и блока питания. Диапазон измерения коэффициента световозвращения прибора составляет 1—999 кд/(лк·м²), угол наблюдения образца — $0,33^\circ$, угол освещения — 5° . Однако этот прибор также не способен измерять удельный коэффициент K силы света световозвращающих материалов.

Недостатком перечисленных приборов является и то, что они не позволяют измерять коэффициент K в зависимости от угла падения потока излучения, что немаловажно для материалов для дорожных знаков, которые должны быть хорошо видны при боковом освещении.

И главное, исходя из данных по диапазону измеряемой величины вышерассмотренными приборами, их чувствительность составляет 1 кд/(лк·м²). Так как световозвращающие поверхности синего цвета могут иметь удельный коэффициент силы света порядка 2 кд/(лк·м²), при такой чувствительности погрешность считывания значения коэффициента силы света составит $\pm 50\%$. Основная относительная погрешность



Рис. 1. Внешний вид установки

измерений будет еще больше. Немного меньшими будут погрешности для других окрашенных (цветных) материалов.

Предлагаемая специализированная установка ИДНМ4.023.000.000 (рис. 1) позволяет проводить измерения параметров материалов со световозвращающим эффектом в полном соответствии с ДСТУ 4100-2002.

Блок-схема и взаимное расположение приборов, входящих в состав установки, приведены на рис. 2.

Осветитель 4 создает в плоскости исследуемого образца 7 освещенность от 1 до 20 лк. Изменяют освещенность посредством диафрагмы объектива осветителя. Корпус осветителя установлен на четырех регулируемых ножках. Изменение высоты и угла наклона осветителя позволяет юстировать систему «осветитель — опытный образец». Для юстирования системы используется юстировочное зеркало 9. Рабочий режим осветителя обеспечивает блок питания 2 типа СНП-40. Контроль тока лампы осветителя проводится амперметром 1 типа М2015. Угловые апертуры осветителя (δ), фотоприемника (γ) и образца (η) составляют не более $10'$ и обеспечиваются конструкцией установки. Удельный коэффициент силы света исследуемого образца определяется расчетным путем по измеренным значениям освещенности. Измерение освещенности в плоскости образца проводится фотометром 8, в плоскости наблюдения — посредством люксметра малых уровней освещенности 3.

Поворотный столик 6 имеет регулируемые ножки, что позволяет изменять его высоту и угол наклона. Столик обеспечивает измерение удельного коэффициента силы света образца при повороте образца (угол освещения β) в пределах $\pm 50^\circ$.

Перемещением фотометрической головки люксметра в кронштейне обеспечиваются измерения при углах наблюдения $12'$, $20'$ и $1^\circ 30'$.

После юстирования установки исследуемый образец устанавливают на поворотном столике и засвечивают потоком излучения, который после отражения от образца попадает на фотометрическую головку люксметра. По известным размерам освещенной

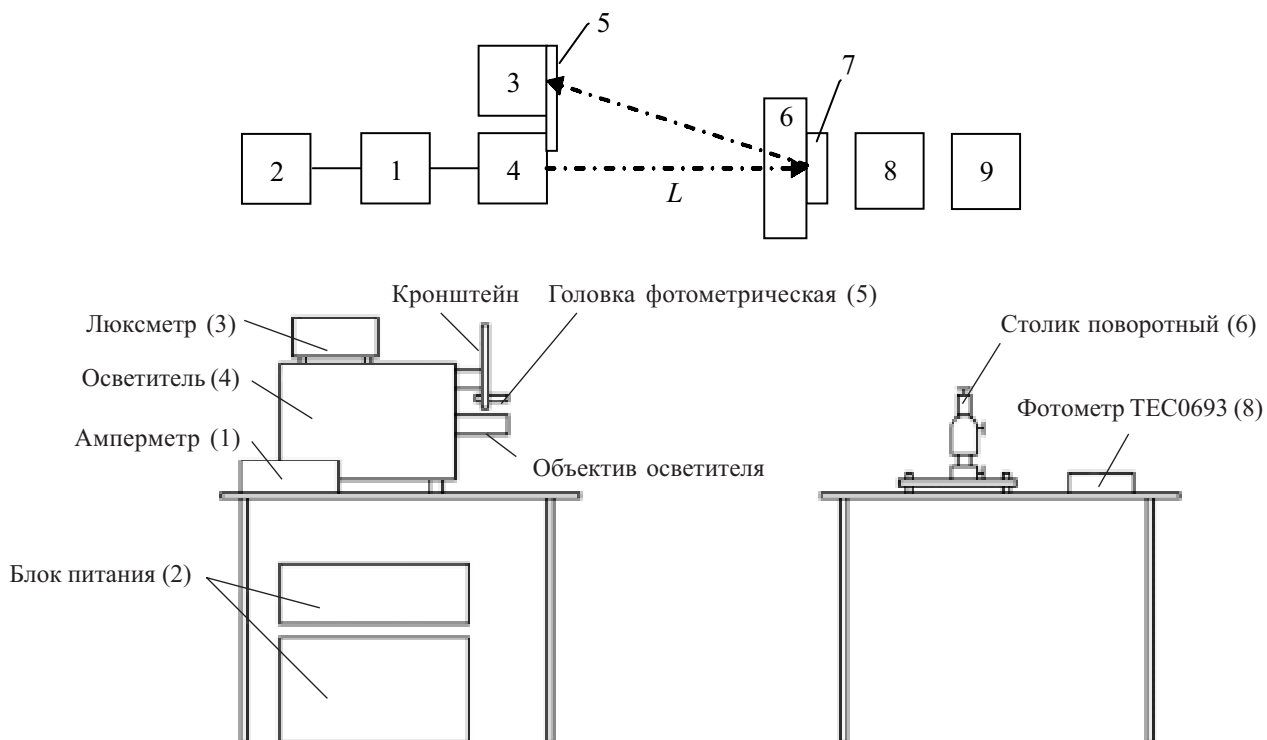


Рис. 2. Блок-схема и взаимное расположение приборов, входящих в состав установки ИДНМ4.023.000.000

площади образца (A), расстоянию между образцом и плоскостью наблюдения (L), измеренным значениям освещенности в плоскости образца (E_0) и в плоскости наблюдения (E_1) рассчитывают удельный коэффициент силы света образца по формуле

$$K = \frac{E_1 L^2}{E_0 A}. \quad (1)$$

Диапазон измерения люксметра низких уровней освещенности составляет 10^{-5} — 10^3 лк. Пределы допускаемой основной относительной погрешности — не более $\pm 10\%$. Относительная спектральная характеристика чувствительности $S_{\text{отн}}(\lambda)$ фотометрической головки воспроизводит относительную спектральную световую эффективность монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$ с отклонением не более 5% в области длин волн от 0,4 до 0,75 мкм и не более 1% при длине волны от 0,3 до 0,4 мкм и от 0,75 до 1,2 мкм.

Согласно ДСТУ 4100-2002, расстояние от образца до люксметра составляет 10 м, освещаемая площадь опытного образца — около $7 \cdot 10^{-2}$ м². Диапазон изменения освещенности в плоскости образца состав-

ляет от 1 до 20 лк при неравномерности освещенности меньше 5%.

С учетом приведенных данных по формуле (1) можно определить, что конструкция установки обеспечивает измерение коэффициента K в пределах от 10^{-1} до 10^4 кд/(лк·м²) при величине основной допускаемой относительной погрешности не более $\pm 15\%$.

Таким образом, предложенная установка позволяет измерять удельный коэффициент силы света световозвращающих поверхностей в полном соответствии с требованиями ДСТУ 4100-2002 в более широком по сравнению с аналогами диапазоне.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. <http://www.reflector.ru/Products.htm>
2. ГОСТ Р 52290-2004 Знаки дорожные. Общие технические условия.
3. ДСТУ 078-45-003-97 Галузевий стандарт. Безпека дорожнього руху. Смуги світлоповертальні для спеціального одягу співробітників Державтоінспекції.
4. ДСТУ 4100-2002. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування.
5. http://www.n-olivera.ru/gibdd/index.php?tb=d_sign&id=1
6. http://ns1.npkgoi.ru/itc/r_1251/developments/road_reflekt.htm
7. <http://www.tenzor.org.ua>

НОВЫЕ КНИГИ

Загидуллин Р. Ш. Multisim, LabVIEW и Signal Express. Практика автоматизированного проектирования электронных устройств.— М.: Горячая линия — Телеком, 2009.— 366 с.

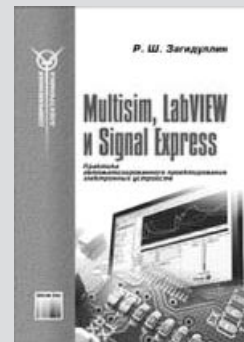
Рассмотрена современная технология разработки, тестирования и изготовления электронных устройств с интегрированным использованием программы системы автоматизированного проектирования Multisim, программы моделирования и сбора данных LabVIEW и программы автоматизации эксперимента Signal Express.

Multisim при его интегрировании с LabVIEW впервые дает инженеру возможность анализа непосредственного взаимодействия реальных, физических сигналов с моделируемыми схмотехническими решениями. Multisim позволяет анализировать решения с использованием микропроцессоров, а после отладки схмотехнического решения предоставляет широкие возможности по подготовке печатных плат.

LabVIEW — открытая среда графического программирования, де-факто ставшей стандартом в области разработки контрольно-измерительных и автоматизированных систем, дает возможность решения аналитических и численных задач и приложений.

Signal Express позволяет легко разрабатывать решения для построения экспериментальных исследований и анализировать результаты решений, полученных при моделировании и экспериментальном исследовании.

Книга написана на основании педагогического опыта кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н. Э. Баумана и может использоваться в качестве учебного пособия для лиц, желающих самостоятельно освоить использование программ LabVIEW, Multisim и Signal Express. Для студентов вузов, специалистов, работающих в области автоматизации проектирования электронной аппаратуры, разработчиков и исследователей устройств автоматики, измерительной техники и электронной аппаратуры.



К. т. н. И. Ю. ГРИШИН

Украина, г. Ялта, Крымский государственный гуманитарный ун-т
E-mail: igrishin@ukr.netДата поступления в редакцию
23.02 — 16.07 2009 г.Оппонент д. т. н. С. М. СМОЛЬСКИЙ
(ИРЭ МЭИ, г. Москва)ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОИСКА
НЕИЗВЕСТНОГО КОЛИЧЕСТВА ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

Предлагается метод оптимального управления РЛС в режиме обнаружения движущихся объектов в условиях стохастической неопределенности, позволяющий существенно сократить среднее время их поиска.

Современные радиолокационные системы, оснащенные фазированными антенными решетками (ФАР), обладают повышенным энергетическим и информационным потенциалом по сравнению с радиолокаторами предыдущих поколений, производящими круговой или секторный обзор вращающимися антеннами. Обслуживание объектов, находящихся в зоне обзора, начинается с обнаружения этих объектов. Чем раньше будет обнаружен объект, тем больше времени может быть выделено на его эффективное обслуживание в других режимах (сопровождение, наведение). Поэтому разработка методов оптимального управления современными радиолокационными системами (РЛС) в режиме обнаружения объектов является актуальной проблемой.

Теория поиска движущихся объектов берет начало в работах Купмана [1]. Позже появился ряд работ [2—4], посвященных различным аспектам этой теории, однако особенности современных радиолокационных систем в них не могли быть учтены. Представляет интерес применение данной теории к современным радиолокационным средствам, оснащенным ФАР и позволяющим реализовывать более гибкие стратегии поиска движущихся объектов.

Статья посвящена разработке метода оптимального управления современной радиолокационной системой с ФАР, который позволит минимизировать время поиска движущихся объектов в зоне обзора.

В настоящей работе предлагается подход, связанный с дискретизацией процесса обнаружения движущихся объектов как по времени, так и по состоянию. Он заключается в том, что на конечном множестве состояний задается закон преобразования функции распределения состояния в виде рекуррентного алгоритма формирования апостериорных плотностей [5]. Для оптимизации процесса поиска используется дискретный аналог принципа максимума. Предположим, что область, в которой движутся объекты, разделена на ячейки, каждую из которых будем отождествлять с некоторым состоянием. Объекты могут на-

ходиться в каждой из ячеек в течение случайного по продолжительности промежутка времени и затем скачкообразно передвигаться в другие ячейки. Таким образом, получим динамический процесс с конечным числом состояний и промежутков времени.

Используя подход, предложенный Добби [6], выражение для экстраполированной вероятности наличия объекта в ячейке может быть записано в следующем виде:

$$P_{\pi i}(t+1) = \hat{P}_i(t) + \left[\hat{P}_1(t)P(i/1) + \dots + \hat{P}_{i-1}(t)P(i/(i-1)) + \right. \\ \left. + \hat{P}_{i+1}(t)P(i/(i+1)) + \dots + \hat{P}_N(t)P(i/N) \right] + P_{\pi i}, \quad (1)$$

где $\hat{P}_i(t)$ — апостериорная вероятность наличия объекта в i -й ячейке в момент времени t ;

$P(i/j)$ — вероятность того, что за промежуток времени $(t, t+1)$ объект переместится из j -й ячейки в i -ю;

$P_{\pi i}$ — вероятность появления в i -й ячейке нового объекта;
 $i = 1, \dots, N$;

N — количество ячеек в зоне обзора.

Обозначим через P_{ij} вероятность перемещения объектов из других ячеек зоны в ячейку с номером i :

$$P_{ij} = \hat{P}_1P(i/1) + \dots + \hat{P}_{i-1}(t)P(i/(i-1)) + \\ + \hat{P}_{i+1}(t)P(i/(i+1)) + \dots + \hat{P}_N(t)P(i/N).$$

С учетом введенного обозначения, представим (1) в виде

$$P_{\pi i}(t+1) = \hat{P}_i(t)P(i/j) + P_{ij} + P_{\pi i}. \quad (2)$$

В дальнейшем будем считать, что $P_{\pi i} = 0$. Это обстоятельство не влияет на общность решения задачи и, в случае необходимости, ненулевое значение всегда можно учесть.

После очередного осмотра i -й ячейки апостериорная вероятность наличия объекта в ячейке определяется по формуле [6]

$$\hat{P}_i(t) = \frac{P_{\pi i}(t-1)[1 + z_i(x/u, t-1)]}{1 + P_{\pi i}(t-1)z_i(x/u, t-1)}, \quad (3)$$

где $z_i(x/u, t) = \frac{P_{1i}(x/u, t) - P_{0i}(x/u, t)}{P_{0i}(x/u, t)}$, причем

$$P_{\lambda i}(x/u, t) = \begin{cases} P_{1i}(x/u, t); \\ P_{0i}(x/u, t); \end{cases} \quad \text{— плотность вероятности,}$$

которую имеет случайная величина $x(t)=x$ на выходе поискового устройства, если в соответствующей области пространства объект есть ($\lambda=1$) или объекта нет ($\lambda=0$).

В качестве критерия оптимальности обзора выберем среднее время поиска объекта [7] и потребуем, чтобы оно было минимальным.

С учетом изложенного выше, задачу управления поиском неизвестного количества движущихся объектов можно сформулировать следующим образом. На заданном временном интервале $[0, L]$ поиск следует организовать так, чтобы в конце этого интервала среднее время поиска объекта было минимальным. Таким образом, необходимо найти набор управляющих параметров $u^0=\{u_i(t)\}$, которые удовлетворяют критерию

$$\bar{T} \Rightarrow \min(u) \quad (4)$$

при ограничениях

$$u_i(t) = \begin{cases} 1; \\ 0, i = 1, \dots, N; \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N u_i(t) = 1. \quad (6)$$

Метод оптимизации процесса поиска

Рассмотренная задача сводится к известной в теории автоматического управления задаче оптимального управления со свободным правым концом [8], в которой элементами фазового пространства являются экстраполированные вероятности наличия объекта в ячейке зоны обзора.

Такую оптимизационную задачу удобнее решать с помощью дискретного аналога принципа максимума, применение которого в соответствии с [8, 9] дает не только необходимые, но и достаточные условия оптимальности.

Для рассматриваемой задачи (4) уравнение состояния фазовых переменных запишем в виде следующего соотношения:

$$P_i(t+1) = \left[P_i(t) \frac{1+u_i(t)z_i(t)}{1+P_i(t)u_i(t)z_i(t)} + P_{ij} \right] \times \\ \times [U_+(P_i(t)) - U_+(P_i(t) - P^*)], \quad (7)$$

где P^* — пороговое значение апостериорной вероятности наличия объекта, при котором считается, что объект обнаружен;

U_+ — ступенчатая функция [10].

С учетом введенных обозначений, гамильтониан задачи может быть представлен в виде

$$H[P(t), u(t), \gamma(t+1)] = \sum_{i=1}^N \gamma_i(t+1) P_i(t+1), \quad (8)$$

где $\gamma_i(t)$ — сопряженные переменные.

В соответствии с требованиями принципа максимума, каноническое уравнение для сопряженных переменных имеет вид

$$\gamma_i(t) = -\gamma_i(t+1) \frac{1+u_i(t)z_i(t)}{[1+P_i(t)u_i(t)z_i(t)]^2} \times \\ \times [U_+(P_i(t)) - U_+(P_i(t) - P^*)] \quad (9)$$

при условии трансверсальности

$$\gamma_i[L] = -1, \quad i = 1, \dots, N. \quad (10)$$

Оптимальную функцию управления найдем из условия

$$H[P^{\text{opt}}(t), u^{\text{opt}}(t), \gamma(t+1)] = \\ = \max H[P(t), u(t), \gamma(t+1)]. \quad (11)$$

В результате решения задачи (4) в соответствии с условием (11), был получен параметр управления для каждого момента времени

$$u_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i \frac{1-P_i(t)}{1+P_i(t)z_i(t)} = \min_{j=1, \dots, N} \left\{ a_j \frac{1-P_j(t)}{1+P_j(t)z_j(t)} \right\}; \\ 0, & \text{для всех остальных } j \neq i, \end{cases} \quad (12)$$

где $a_{ij} = \gamma_{ij}(t+1)P_{ij}z_{ij}(t)$;
 $i \neq j$;
 $i, j = 1, \dots, N$.

Однако при ограничениях (5, 6) решить задачу (4) аналитически не удастся, т. к. существует взаимосвязь между H , γ и u . Поэтому решается она численно, с использованием метода последовательных приближений.

На основе разработанного метода был синтезирован алгоритм оптимизации поиска неизвестного количества движущихся объектов.

Результаты моделирования

С помощью ПЭВМ было проведено математическое моделирование процесса работы обзорной РЛС с фазированной антенной решеткой, реализующей разработанный алгоритм поиска неизвестного количества движущихся объектов. В качестве базового для сравнения использовался наиболее популярный алгоритм с равномерным распределением поисковых усилий по ячейкам зоны обзора и их последовательным осмотром. Результаты моделирования показывают, что при использовании алгоритма оптимального управления РЛС с фазированными антенными решетками среднее время поиска объектов, в зависимости от условий информативности, может быть существенно сокращено (в 1,5—3,5 раза).

Таким образом, разработанный метод управления поиском движущихся объектов в зоне обзора РЛС позволяет минимизировать время обнаружения объектов, сокращая время поиска в несколько раз, что, в свою очередь, позволит более эффективно реализовывать другие режимы работы радиолокационной системы.

В дальнейшем предложенный метод необходимо усовершенствовать с целью учета особенностей фун-

кционирования многопозиционных радиолокационных систем.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Koopman B. O. The theory of search. 1—3 // Operation Research.— 1956.— N 4.— P. 324—346, p. 503—531; 1957.— N 5.— P. 613—626.
2. Абчук В. А., Суздаль В. Г. Поиск объектов.— М.: Сов. радио, 1977.
3. Альсведе-Вегенер И. Задачи поиска.— М.: Мир, 1982.
4. Чикрий А. А., Клименко Е. В. Дискретная задача поиска при априорной информированности // Кибернетика и вычислительная техника.— 1988.— Вып. 79.— С. 60—70.
5. Бакут П. А., Жулина Ю. В., Иванчук Н. А. Обнаружение движущихся объектов.— М.: Сов. радио, 1980.
6. Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска.— М.: Наука, 1985.
7. Дулевич В. Е. Теоретические основы радиолокации.— М.: Сов. радио, 1978.
8. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г. Математическая теория оптимальных процессов.— М.: Физматгиз, 1961.
9. Атанс М., Фалб П. Л. Оптимальное управление.— М.: Машиностроение, 1968.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике.— М.: Наука, 1984.

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

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

- Радиоволновые датчики дымовых газов ТЭС. (Украина, г. Харьков)
- Модели сопротивления электродов тонкопленочного резистора. (Россия, г. Арзамас)
- Эффект усиления тока в обратно-включенной двухпереходной арсенидгаллиевой $n-p-m$ -структуре. (Республика Узбекистан, г. Ташкент)
- Плазмохимический реактор для травления торцов фотоэлектрических преобразователей и его технологические испытания. (Украина, г. Киев)
- Адсорбционно-кинетическая модель осаждения пленок поликристаллического кремния, легированного фосфором в процессе роста. (Республика Беларусь, г. Минск)
- Оценка структурной избыточности БИС с помощью помехоустойчивой кластеризации. (Украина, г. Одесса)
- Закономерности формирования пучка ионов низкой энергии при помощи односеточной ионно-оптической системы. (Украина, г. Харьков)



- Математические модели формирования химической связи твердых растворов CdSb–ZnSb. (Украина, г. Черновцы)
- Повышение зонной избирательности электромагнитных кристаллов. (Украина, г. Киев)
- Влияние термического окисления на анизотропию электропроводности и фотопроводимости наноструктурированного кремния (Россия, г. Москва)
- Дифференциальный термометр с высокой разрешающей способностью. (Украина, г. Львов, г. Винница)

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

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

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Андреев В. А., Портнов Э. Л., Кочановский Л. Н. Направляющие системы электросвязи. Т. 1. Теория передачи и влияния.— М.: Горячая линия — Телеком.— 2009, 424 с.

Рассматриваются состояние, принципы построения и перспективы развития сетей электросвязи Российской Федерации. Излагается теория передачи по различным типам направляющих систем электросвязи (коаксиальным, симметричным, волоконно-оптическим, сверхпроводящим, волноводным), приводятся их конструкции и характеристики. Рассматриваются также электрические влияния между проводными цепями, влияние внешних электромагнитных полей, коррозии и методы их уменьшения. По сравнению с предыдущим изданием существенно обновлены и расширены разделы, посвященные теории и развитию волоконно-оптических систем передачи и кабелей.



К. т. н. И. И. РУБЦЕВИЧ, В. Б. ВЫСОЦКИЙ,
Н. С. КОВАЛЬЧУК

Республика Беларусь, г. Минск, Завод «Транзистор»,
Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники
E-mail: 7033696@mail.ru

Дата поступления в редакцию
20.05 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. Л. КОСТЕНКО
(ОНПУ, г. Одесса)

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МЕМБРАННЫХ ДАТЧИКОВ

Предложена оптимизированная конструкция газового анализатора с уменьшенным энергопотреблением за счет использования многослойной мембраны.

Быстрое развитие промышленности и транспорта привело в последнее десятилетие к резкому увеличению содержания различных газов-загрязнителей в воздухе. К числу этих газов относятся, прежде всего, СО, углеводороды (метан, пропан, пары бензина), аммиак, оксиды азота, озон. Они не только представляют опасность с экологической точки зрения, но и могут являться причиной техногенных катастроф (взрывов, пожаров, массовых отравлений и т. д.). Поэтому научные исследования и промышленные разработки направлены на создание новых средств защиты и предупреждения аварий на предприятиях. Одним из таких средств является полупроводниковый датчик (сенсор), чувствительный к метану, угарному газу и другим горючим и токсичным газам. Современные полупроводниковые датчики способны обнаруживать в воздухе посторонние газы с концентрацией до 0,0001%, и имеется постоянная тенденция к повышению их чувствительности. Чувствительность датчика к газу может быть определена как отношение сопротивления сенсорного элемента на воздухе в отсутствие газа к его сопротивлению при наличии газа.

Для решения современных задач обеспечения безопасности жизнедеятельности человека и оперативного экологического контроля окружающей среды наиболее перспективными представляются металлооксидные полупроводниковые и термокаталитические сенсоры. Принцип действия металлооксидных полупроводниковых сенсоров основан на изменении проводимости газочувствительного слоя на поверхности полупроводника при химической сорбции различных газов, например газов-доноров (горючих газов, включая метан, пропан, пары бензина, аммиака, СО, сероводород и др.) или газов-акцепторов (озона, оксидов азота, хлора, фтора). Хемосорбция этих примесей приводит к обратимому изменению концентрации носителей заряда в полупроводнике и соответствующим образом изменяет проводимость чувствительного слоя. Для достаточно быстрого протекания химических реакций на поверхности полупроводника — с постоянной времени на уровне несколь-

ких секунд — сенсор нагревают до высокой температуры (от 523 К — для датчиков паров спирта, водорода, до 773 К — для датчиков метана). Для каждого типа газа существует оптимальный температурный диапазон [1, 2].

Таким образом, актуальной задачей остается разработка конструкции и технологии изготовления малогабаритных сенсоров с уменьшенным энергопотреблением, пригодных для применения в переносных и карманных приборах, а также в приборах, длительное время работающих от автономных источников питания.

Теоретический анализ

В настоящее время в технологии изготовления датчиков и микроэлектромеханических систем (МЭМС) одной из основных задач является получение элементов конструкции (мембран, балок) с минимальными механическими напряжениями. Решение этой задачи достигается правильным выбором конструкции сенсора. Датчики мембранных конструкций для нагрева и работы в непрерывном режиме при температуре 720 К потребляют на порядок меньшую мощность, чем классические толстопленочные сенсоры на основе пористого алюминия толщиной 20—50 мкм [3]. В свою очередь, потребляемая мощность мембранного газового датчика определяется толщиной мембраны, соотношением площади чувствительного слоя и площади мембраны и теплопроводностью материала мембраны [4].

В последнее время нашел широкое применение датчик с многослойной мембраной. Важнейшим элементом его конструкции является мембрана, материалом для которой может служить нитрид кремния или поликристаллический кремний [5]. Мембраны на основе диэлектрической пленки нитрида кремния использовать предпочтительнее, т. к. они обладают хорошими электрическими характеристиками. Пленки нитрида кремния можно использовать и как материал диэлектрической мембраны, и как изолятор для поликристаллической мембраны, и как стойкие маски при химическом и плазменном травлении кремния [6, 7]. Однако, наряду с преимуществами, существуют и технологические трудности формирования пленок нитрида кремния толщиной 0,6—1,0 мкм с минимальным механическим напряжением.

Преимущества многослойной конструкции мембраны, состоящей из последовательных слоев оксида

и нитрида кремния, связаны с тем, что различие коэффициентов температурного расширения этих материалов позволяет компенсировать механические напряжения, возникающие в мембране при температурном ударе, и получить поверхность с минимальными механическими напряжениями площадью в несколько квадратных миллиметров толщиной 1—2 мкм. С другой стороны, увеличение числа слоев приводит к увеличению потребляемой мощности. Поэтому для уменьшения толщины мембраны необходимо разработать технологический процесс осаждения пленки нитрида кремния с минимальным механическим напряжением в рабочем диапазоне температуры сенсора.

Механические напряжения растяжения пленок нитрида кремния, полученных методом химического вакуумного осаждения при пониженном давлении, зависят от режимов нанесения, в первую очередь от температуры осаждения, рабочего давления и состава газовой среды [8]. При стандартных режимах нанесения остаточное напряжение на границе «кремний—нитрид кремния» достигает 1,3 ГПа. Поэтому толщина пленок может достичь всего 0,2—0,3 мкм, причем только при наличии компенсирующего окисного подслоя. Такое высокое механическое напряжение приводит к растрескиванию мембран и балок. Для повышения надежности и стабильности работы мембранных датчиков необходимо увеличить толщину пленки нитрида кремния до 1,0 мкм, сохраняя при этом ненапряженную структуру пленки без окисного подслоя, который ухудшает тепловые характеристики мембраны. В ходе исследований [9] решалась технологическая задача получения пленок нитрида кремния, обладающих минимальным механическим напряжением 170—200 МПа, которые можно использовать в качестве диэлектрических мембран МЭМС, что потребовало существенной оптимизации процесса их получения.

В настоящей работе рассматривается конструкция мембранного датчика на основе нитрида кремния с платиновой металлизацией и диэлектрической пассивацией металлической разводки. Такая конструкция широко используется в производстве датчиков расхода и болометров.

Сложность получения системы с низким механическим напряжением заключается в наличии у платиновой пленки высокого механического напряжения растяжения (порядка 0,6—0,7 ГПа), которое еще и возрастает при различных технологических процессах отжига и пассивации. В связи с этим было предложено компенсировать высокое растягивающее напряжение платиновой пленки как за счет уменьшения напряжения в пленке нитрида кремния, так и за счет достижения напряжения сжатия пассивирующей пленки. Пассивирующее покрытие должно наноситься при невысокой температуре во избежание окисления пленки никеля.

Была исследована зависимость механического напряжения пленок нитрида кремния от параметров технологических процессов их получения с добавками низкотемпературного фосфоросиликатного стекла с минимальным механическим напряжением растяжения. Также был проведен выбор дополнительного слоя

с механическим напряжением сжатия для компенсации механического напряжения мембраны.

Методика эксперимента

Осаждение пленок нитрида кремния осуществлялось методом аммонолиза дихлорсилана (SiH_2Cl_2) в промышленном реакторе пониженного давления с горячими стенками горизонтального типа «Изотрон-4-150». В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния КДБ-12 диаметром 100 мм. Общее давление в реакторе составляло 30 Па, температура осаждения — 1093 К. Температурный профиль по зонам осаждения поддерживался с точностью ± 1 К. Отношение объемов дихлорсилана и аммиака ($\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$) изменялось от 0,25 до 10. Использовались дихлорсилан и аммиак электронного класса чистоты. Толщина пленок нитрида кремния определялась с помощью многоуровневой эллипсометрии на установке ЛЭФ-3М. Механическое напряжение измеряли по смещению дифракционного пика отражения от системы атомных плоскостей на рентгеновской двухкристаллической топографической установке типа РДТ.

Для получения подслоя анодированного окисла (Al_2O_3) сначала методом термического распыления наносилась пленка Al толщиной 0,2 мкм, затем проводилось ее анодирование в растворах на основе ортофосфорной кислоты на всю глубину пленки. Металлизация разводки проводилась методом трехэлектродного распыления платины в атмосфере Ag при давлении 10^{-3} Па и ускоряющем напряжении 3 кВ.

Результаты эксперимента

Проведенные исследования показали, что в широком диапазоне технологических параметров пленки, входящие в состав мембраны, обладают механическим напряжением растяжения. Чтобы компенсировать это напряжение, было предложено ввести дополнительный слой среднетемпературного фосфоросиликатного стекла (ФСС). Установлено, что при толщине слоя платины 0,3 мкм оптимальной толщиной слоя фосфоросиликатного стекла является 0,6 мкм. При отношении объемов кислорода и моносилана, равном 2, были получены пленки с напряжением сжатия, равным 180 МПа (рис. 1).

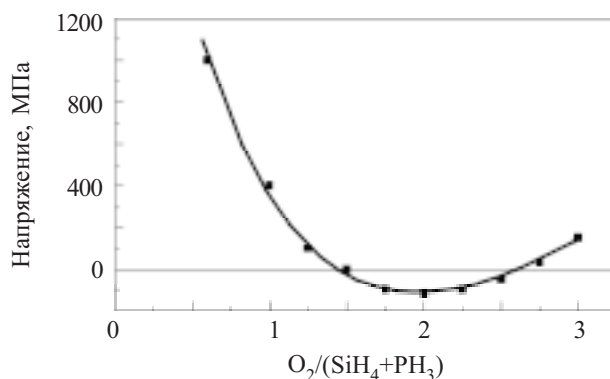


Рис. 1. Зависимость остаточного напряжения от соотношения объемов газов в пленках ФСС, полученных при температуре 723 К

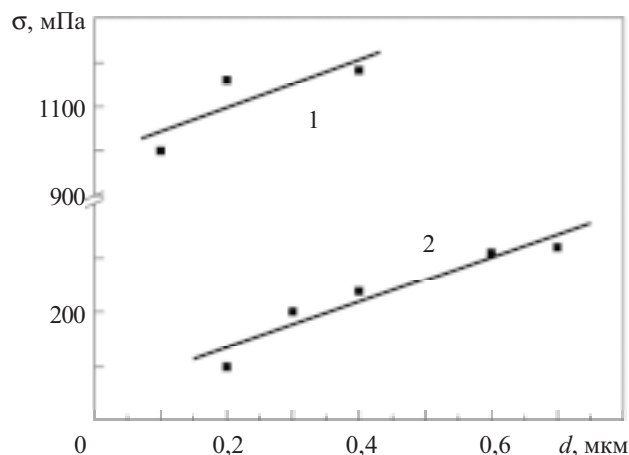


Рис. 2. Зависимость механического напряжения от толщины пленки нитрида кремния при различных отношениях объемов $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$:
1 — 1/4; 2 — 4/1

На рис. 2 показана зависимость механического напряжения пленки нитрида кремния от ее толщины при отношении объемов рабочих газов дихлосилана и аммиака 1/4 и 4/1. Видно, что пленки, полученные при отношении 4/1, имеют значения механического напряжения на порядок меньше, чем при 1/4.

Разводку высокотемпературных датчиков металлизировать, в основном, золотом, платиной и никелем (для более низких значений рабочей температуры). Такие металлические пленки обладают низкой адгезией к диэлектрическим пленкам. Использование в качестве подслоя для улучшения адгезии V_a , Cr и т. п. приводит к ухудшению стабильности и электрических параметров. Адгезия определялась величиной усилия отрыва приваренной платиновой проволоки. Для улучшения адгезии предлагается использовать в качестве подслоя пленку анодированного Al , которая обладает высокой структурной и химической стойкостью при высокой температуре. Улучшение адгезии при использовании пористого Al происходит за счет

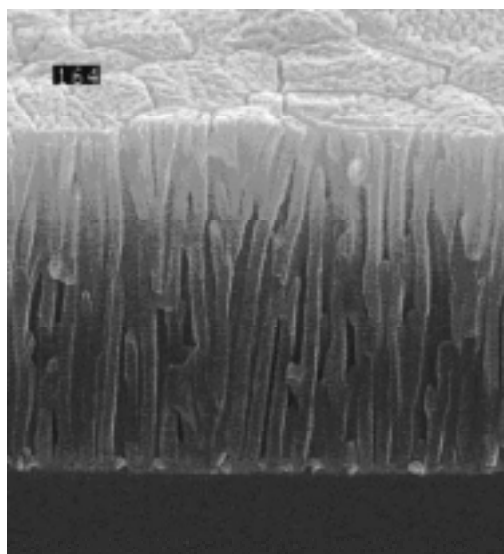


Рис. 3. Анодированный Al

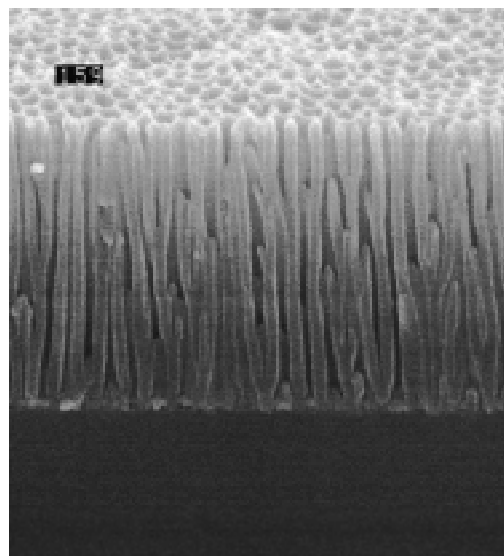


Рис. 4. Анодированный Al с растравленными порами

увеличения эффективной площади контактирования напыляемой пленки с поверхностью подложки, т. к. напыляемая пленка проникает вглубь пор, и в зависимости от диаметра пор площадь соприкосновения увеличивается в 5—6 раз.

При металлизации мембранных датчиков платиной толщина ее слоя составляет 0,2—0,3 мкм, что позволяет использовать его в качестве нагревателя тонкой мембраны. В связи с этим накладывается ограничение на диаметр пор анодированного Al — для обеспечения равномерной толщины слоя металлизации он не должен превышать 200 Å. На рис. 3 видно, что вершины пор сужены, что затрудняет проникновение атомов металла вглубь поры и уменьшает эффективную площадь контактирования. Для увеличения эффективной площади контактирования проводилось растравливание вершин пор в концентрированной ортофосфорной кислоте (рис. 4).

Толщина пленки платины, используемой в качестве нагревателя, составляет 0,2 мкм. Полученная пленка имеет ровную зеркальную поверхность, что обеспечивает возможность проведения фотолитографии и равномерной по электрическим свойствам разводки. Проверка адгезии Pt -пленки показала, что при напылении Pt на диэлектрическую пленку без подслоя усилие отрыва составляло 2—3 г, при напыле-

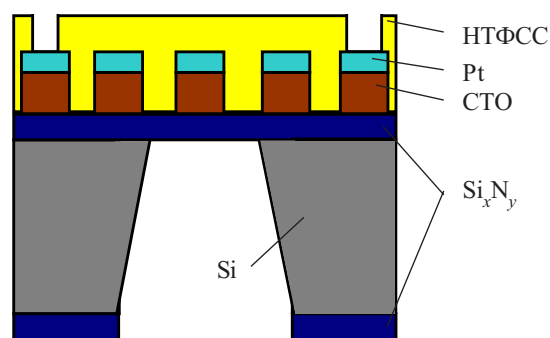


Рис. 5. Структура мембранного газового датчика

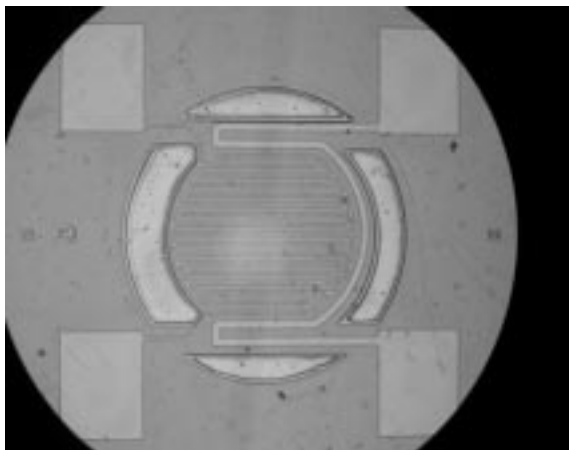


Рис. 6. Кристалл датчика газового анализатора

нии же на пленку анодированного Al оно превышало 10 г. При напылении на анодированный Al с растравленными вершинами пор усилие отрыва превышало 15 г, что приводило к разрыву платиновой проволоки диаметром 20 мкм.

На рис. 5 представлена структура датчика газового анализатора с мембраной на основе пленки нитрида кремния толщиной 1,0 мкм, дополнительным слоем среднетемпературного оксида кремния (СТО), нагревателем на основе пленки платины толщиной 0,3 мкм, пассивированной низкотемпературным фосфоросиликатным стеклом (НТФСС) толщиной 0,6 мкм. На рис. 6 показана фотография кристалла датчика газового анализатора оптимизированной конструкции с перфорированной мембраной, которая имеет уменьшенную мощность потребления.

Таким образом, оптимальной конструкцией датчика, обеспечивающей минимальную потребляемую мощность (порядка 50—100 мВт при рабочей температуре мембраны от 370 до 770 К) является кремниевый кристалл размером 2×2 мм с перфорированной

мембраной на основе диэлектрической пленки нитрида кремния толщиной 1,0 мкм. Газоанализаторы с такими датчиками можно использовать для определения концентрации газа, в газодобывающей и газоперерабатывающей промышленности, в медицине, автомобильной технике, в изделиях специального назначения, т. е. в переносных и карманных приборах, длительное время работающих от автономных источников питания.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rosler R. S. Low-pressure CVD production processes for poly nitride and oxide // Solid-State Technology.— 1977.— Vol. 20, N 4.— P. 63—70.
2. French P. J. Development of surface micromachining techniques compatible with on-chip electronics // J. Micromech. Microeng.— 1996.— N 6.— P. 197—211.
3. Wen-Hsien Chuang, Rainer K. An electrostatic actuator for fatigue testing of low-stress LPCVD silicon nitride thin films // Sensor and actuators.— 2005.— A, N 121.— P. 557—565.
4. Penza M., Aversa P., Cassano G. et al. Thin-film bulk-acoustic-resonator gas sensor functionalized with a nanocomposite Langmuir-Blodgett layer of carbon nanotubes // IEEE Transactions on Electron Devices.— 2008.— Vol. 55, N. 5.— P. 1237—1239.
5. Cross R. B. M., De Souza M. M., Deane S. C., Young N. D. A comparison of the performance and stability of ZnO-TFTs with silicon and nitride as gate insulator // IEEE Transactions on Electron Devices.— 2008.— Vol. 55, N. 5.— P. 1109—1115.
6. Arreghini A., Driussi F., Vianello E. et al. Experimental characterization of the vertical position of the trapped charge in Si nitride-based nonvolatile memory cells // IEEE Transactions on Electron Devices.— 2008.— Vol. 55, N. 5.— P. 1211—1219.
7. Han I-S., Ji H-H., You O-S. et al. New observation of mobility and reliability dependence on mechanical film stress in strained silicon CMOSFETs // IEEE Transactions on Electron Devices.— 2008.— Vol. 55, N. 6.— P. 1352—1358.
8. Coffa S. Light from Silicon // IEEE Spectrum.— 2005.— N. 10.— P. 36—41.
9. Paniccia M., Koehl S. The silicon solution // IEEE Spectrum.— 2005.— N. 10.— P. 30—35.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Антипов О. И., Неганов В. А., Потапов А. А. Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / Под ред. Ю. В. Гуляева, С. А. Никитова.— М.: Радиотехника, 2009.— 235 с.

В монографии рассмотрены явления детерминированного хаоса и фрактальности в дискретно-нелинейных системах на примере устройств импульсной силовой электроники, приведены некоторые основные определения современной нелинейной динамики и некоторые математические методы целочисленных и дробных мер. Представленные явления стохастической работы могут наблюдаться в широком классе систем с переменной структурой, действие которых может быть описано системами дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, скачкообразно меняющими свои значения с течением времени в зависимости от состояния системы. Объектами исследования явились импульсные стабилизаторы напряжения различных типов и структур. Научной новизной является применение как фрактальных, так и мультифрактальных мер детерминированного хаоса к анализу стохастической работы импульсных стабилизаторов.

Для специалистов, интересующихся проблемами детерминированного хаоса, численным моделированием дискретно-нелинейных систем.



Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. В. И. ГОЛОТА,
к. т. н. И. Т. КОГУТ, к. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»;
г. Ивано-Франковск, Прикарпатский нац. университет им. В. Стефаника
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
15.05 2009 г.
Оппонент к. т. н. П. В. ПАЩЕНКО
(НИИ ЯФ МГУ, г. Москва)

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ И ТОПОЛОГИИ ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЦЫ УПРАВЛЯЕМЫХ АВТОЭМИССИОННЫХ МИКРОКАТОДОВ

Разработаны приборные элементы на локальных трехмерных КНИ-структурах. Сравниваются расчетные и экспериментальные характеристики КНИ МОП-транзисторов. Спроектирована топология микрокатода, интегрированного со схемой управления.

Автоэмиссионные кремниевые микрокатоды, монолитно интегрированные с элементами управления на одной пластине и мультиплицированные в матрицы больших размеров, могут использоваться как фотошаблоны в разрабатываемых системах цифровой электронной литографии с субмикронной разрешающей способностью. Однако для этого необходимо обеспечить линейное регулирование токов автоэмиссии микрокатодов, работоспособность схемы управления при повышенной температуре, равномерность и непрерывность экспозиции топологических элементов разных размеров. Поэтому актуальными являются исследования по стабилизации и регулированию автоэмиссионного тока, формированию КНИ-структур и элементов на их основе для работы при повышенной температуре, интеграции микрокатодов со схемами управления и объединения их в матрицы для равномерного и непрерывного экспонирования топологических элементов, разработка схем и топологий элементов матрицы управляемых автоэмиссионных кремниевых микрокатодов.

Технология формирования локальных трехмерных КНИ-структур

Современные процессы производства КНИ-пластин (SIMOX, BESOI, ELTran, SmartCut/Unibond) являются дорогостоящими и, в той или иной мере, вносят дефекты в кристаллическую решетку поверхностного монокремниевое слоя [1]. В [2] предложено формировать локальные трехмерные КНИ-структуры непосредственно в кремниевой пластине современными методами КМОП-технологий, такими как фотолитография, локальное термическое окисление с использованием нитридных маскирующих пленок, изотропное и анизотропное плазменное травление, формирование в пластине микрополостей. На рис. 1 показана локальная трехмерная КНИ-структура на завершающем этапе технологии ее формирования.

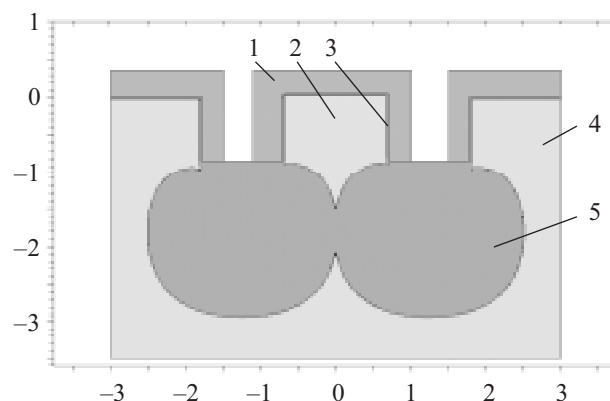


Рис. 1. Локальная трехмерная КНИ МОП-структура:
1 — поликремниевый затвор; 2 — локальная 3D КНИ-структура;
3 — подзатворный изолятор; 4 — подложка Si (100); 5 — область термически окисленного Si

Приборные элементы на локальной 3D КНИ-структуре

Для предложенной локальной трехмерной КНИ-структуры были рассчитаны электрические характеристики и смоделированы следующие оригинальные приборные элементы для микросистемных приложений: стандартный и матричный КНИ КМОП-транзистор с 3D-затвором, ключевой элемент на диодах Шоттки [3], контактные электроды с 3D-поверхностью [4], автоэмиссионный кремниевый микрокатод со схемой управления [5], элемент высокочувствитель-

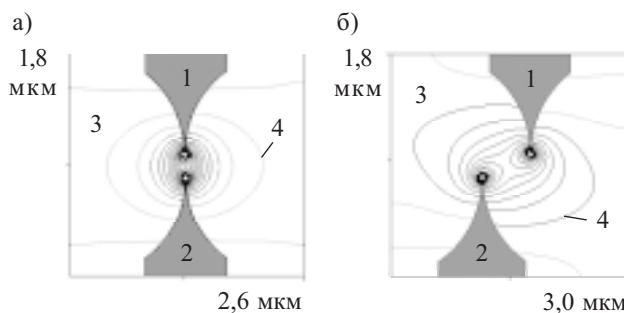


Рис. 2. Высокочувствительный элемент интегрального акселерометра без смещения подвижного элемента (а) и со смещением (б):
1 — подвижный лезвийный микрокатод; 2 — неподвижный микрокатод (подложка); 3 — вакуумная полость; 4 — линии электрического поля

Таблица 1
Ток автоэмиссии при смещении подвижного микро-
катода акселерометра

Смещение, мкм	Напряженность поля, 10^7 В/см	Ток автоэмиссии, 10^{-6} А
0	4,7	1,5
0,2	4,2	0,32
0,4	3,8	0,072

ного акселерометра с регистрацией изменений автоэмиссионного тока. Проведено также компьютерное моделирование последовательности базовых технологических операций формирования микрополостей и микроканалов под поверхностью КНИ-подложки.

На рис. 2 показан высокочувствительный элемент интегрального акселерометра.

При смещении подвижного микрокатода уменьшается напряженность электрического поля в вакуумной полости и, соответственно, ток автоэмиссии, который регистрируется измерительным прибором. Их значения, рассчитанные при разности потенциалов 1000 В между элементами 1 и 2, радиусе кривизны острия лезвийного микрокатода 5 нм и при различных смещениях подвижного катода, приведены в табл. 1.

На рис. 3 показан результат моделирования технологии создания герметизированных микрополостей в кремниевой пластине.

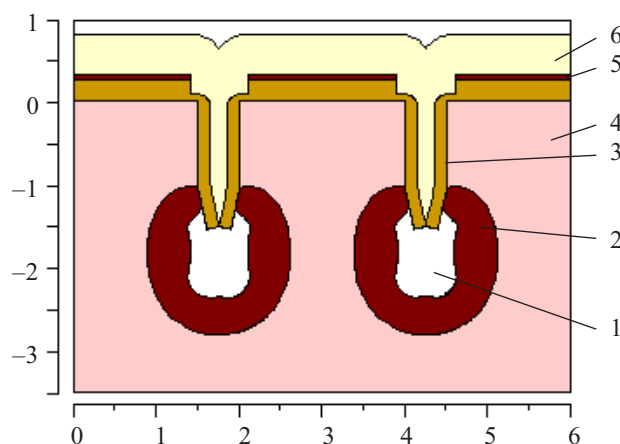


Рис. 3. Поперечное сечение герметизированных микрополостей:

1 — герметизированная полость; 2 — толстый локальный термический оксид; 3 — нитрид кремния; 4 — кремниевая подложка (100); 5 — тонкий термический оксид; 6 — поликремний

Выбор транзисторной модели

Разработанные КНИ МОП-транзисторы могут использоваться в схеме управления микрокатодом, т. к. в отличие от МОП-транзисторов, они являются радиационно-стойкими, занимают меньшую площадь на кристалле, имеют повышенное быстродействие и пониженное энергопотребление, могут работать при повышенных температуре и напряжении. Физические модели для расчета КНИ МОП-транзисторов находятся на стадии разработок и поэтому отсутствуют в доступных программах микроэлектронного моделирова-

ния. В связи с этим были выбраны существующие модели компактных МОП-транзисторов, проведен анализ и выяснена возможность их применения для расчета КНИ МОП-транзисторов. Так, BSIM3/BSIM4-модели достаточно сложны, имеют более сотни параметров со значительной взаимной корреляцией. На сайте разработчика приводится описание модели и ее реализация на языке программирования C, однако исходные коды в ней — неполные, что усложняет их использование для моделирования.

Модель SP основывается на уравнениях поверхностных потенциалов и имеет до 60 параметров [6], однако ее реализация на языках программирования является достаточно сложной задачей.

Модель EKV — наиболее простая, имеет до 20 физических параметров [7], а в литературных источниках приведены исходные коды на языках программирования Verilog-A, Matlab. В EKV-модели при расчетах стокового тока в области сильной и слабой инверсии используется интерполяционная функция $F(v)$, которая инвертируется с использованием итерационной схемы Ньютона-Рафсона, что значительно усложняет ее реализацию. В [8] предложена модифицированная EKV-модель с одним аналитическим уравнением стокового тока для областей сильной и слабой инверсии. В [9] показано, что EKV-модель МОП-транзистора может быть применена для моделирования КНИ МОП-транзистора с незаземленным контактом к подканальной области при ограничении потенциала контакта в уравнении порогового напряжения значением $2\Phi_F$, где Φ_F — потенциал Ферми. Однако лучшим решением при больших потенциалах контакта для предотвращения эффекта «зашелки» является подсоединение подканальной области частично обедненного n -КНИ МОП-транзистора к истоку, как показано на рис. 4.

Для расчета геометрических параметров и статических характеристик КНИ МОП-транзисторов в схеме управления микрокатодом была разработана MatLab-программа модифицированной EKV-модели. Проведены экспериментальные измерения разработанных МОП- и КНИ МОП-транзисторов, изготовленных промышленным способом по технологии с разрешающей способностью 2 мкм. Сравнение расчетных и экспериментальных статических характери-

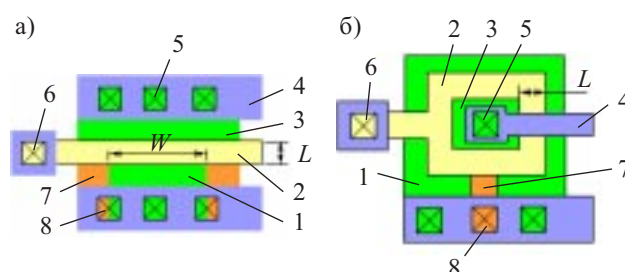


Рис. 4. Топология КНИ МОП-транзистора с затвором прямоугольной (а) и кольцевой (б) формы с подканальной областью, подсоединенной к истоку:

1 — n^+ -исток; 2 — поликремниевый затвор; 3 — n^+ -сток; 4 — металл; 5 — контакт к области n^+ -диффузии; 6 — контакт к поликремнию; 7 — p^+ -контакт к подканальной области; 8 — контакт к области p^+ -диффузии; L — длина канала; W — ширина канала

стик (см. **рис. 5**) показывает, что с помощью компактной EKV-модели МОП-транзистора можно моделировать КНИ МОП-транзисторы с заземленным истоком и контактом к подканальной области при напряжениях стока V_c до 5 В и напряжениях затвора V_3 до 2 В с погрешностью 1—5%.

Схема управления кремниевым автоэмиссионным микрокатодом

Схема управления микрокатодом (**рис. 6**) содержит высоковольтный КНИ МОП-транзистор, импульсно-амплитудный модулятор, коммутационные транзисторы, управляемые тактовыми однополярными им-

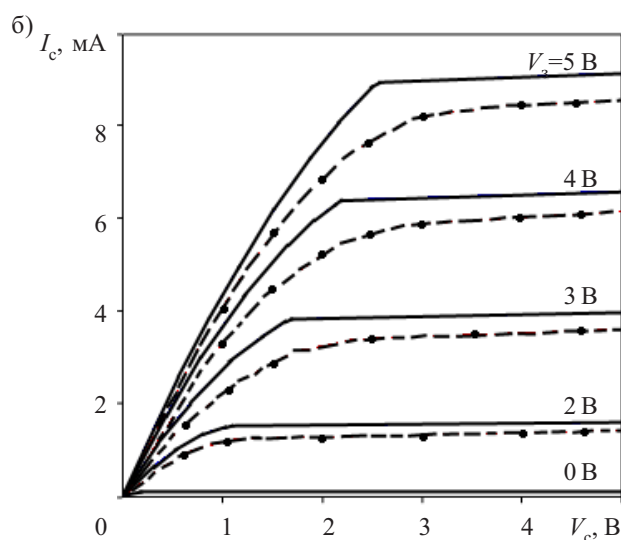
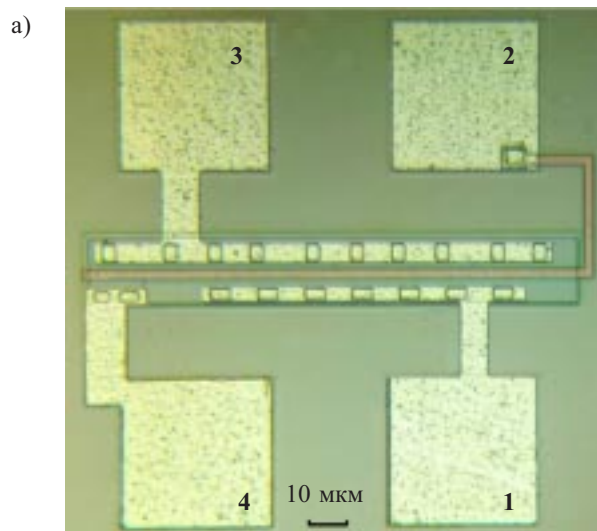


Рис. 5. а) Тестовая структура КНИ МОП-транзистора:

1 — контактная площадка к истоку; 2 — к затвору; 3 — к стоку; 4 — к подканальной области;

б) Статические выходные характеристики тестовой структуры при различных значениях V_3 :

сплошные линии — расчет, пунктир — эксперимент

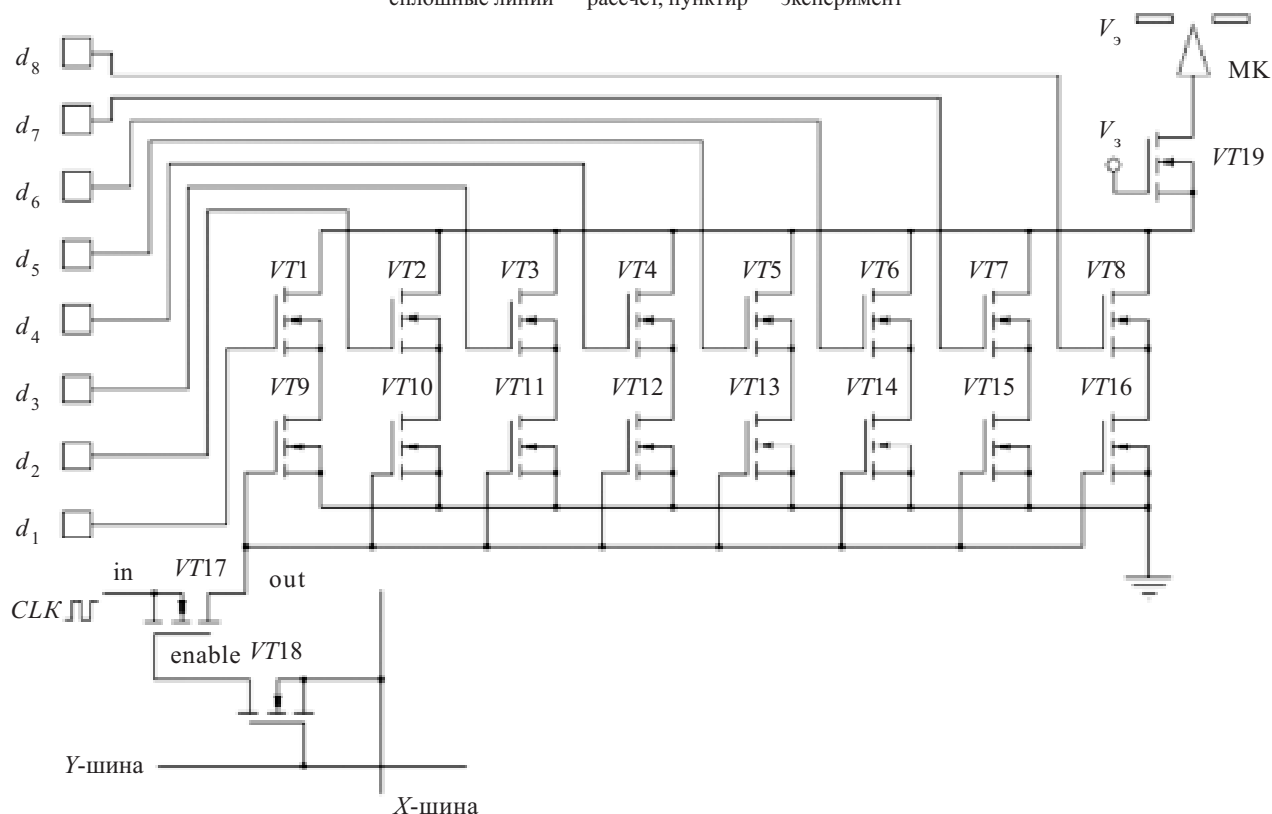


Рис. 6. Схема управления автоэмиссионным микрокатодом:

$d_1, \dots, d_8$ — ячейки памяти; $VT1, \dots, VT8$ — транзисторы импульсно-амплитудного модулятора с $W/L, 2W/L, \dots, 128W/L$, соответственно; $VT9, \dots, VT16$ — коммутационные транзисторы; $VT17$ — транзистор разрешения передачи тактовых импульсов; $VT18$ — транзистор коммутации адресных шин; $VT19$ — высоковольтный КНИ МОП-транзистор; CLK — тактовые импульсы; V_3 — потенциал затвора; V_c — потенциал экстракционного электрода; МК — микрокатод

пульсами, ячейки памяти статического типа. Высоковольтный КНИ МОП-транзистор защищает низковольтные схемы от высокого напряжения на электродах, стабилизирует и ограничивает максимальный ток автоэмиссии, регулирует процессы адсорбции/десорбции на острие микроэлектрода изменением полярности потенциалов системы «микрокатод—электрод». Импульсно-амплитудный модулятор преобразует бинарный код, который хранится в восьми ячейках памяти статического типа, в 256 фиксированных значений автоэмиссионного тока, которые линейно распределены в интервале от 3 нА до 3 мкА. Ячейки памяти программируются в режиме реального времени технологического процесса литографии и управляют включением/выключением микроэлектрода и дозой экспозиции.

Ширина каналов и значения выходного тока транзисторов импульсно-амплитудного модулятора VT1—VT8 последовательно увеличиваются в два раза. При разных комбинациях включения параллельных транзисторов можно получить 256 фиксированных значений суммарного выходного тока на входе высоковольтного транзистора VT19. Разные комбинации включения транзистора задаются содержимым программируемых ячеек памяти $d_1—d_8$. Разработанная схема чтения/записи содержимого ячеек памяти с использованием буферов на три состояния показана на рис. 7.

При значении сигнала $CS=0$ буферы B_1, B_2, B_3 находятся в высокоимпедансном состоянии и отключаются от парафазной шины (Data, $\sim$ Data) ячейки памяти, а при $CS=1$ — подключаются к шине. Парафазная шина коммутируется на буферы ввода (B_1, B_3, B_4)

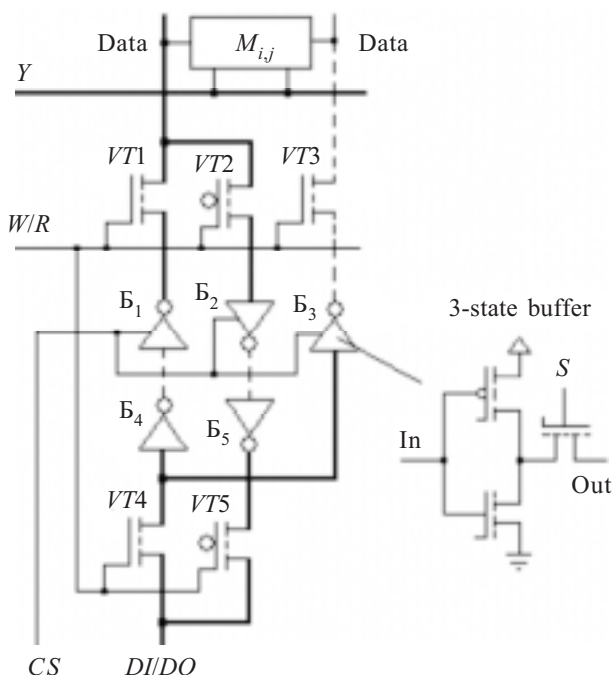


Рис. 7. Схема чтения/записи содержимого ячеек памяти: Y — шина слов; DI/DO — шина данных; сигнал W/R=0/1 — запись/чтение данных; сигнал CS=0/1 — отключение/подключение DI/DO-шины от/к ячейке памяти; B_1, B_3, B_4 — входные буферы; B_2, B_5 — выходные буферы; VT1, ..., VT5 — ключевые транзисторы

или вывода (B_2, B_5) ключевыми транзисторами (VT1—VT5) по сигналу W/R. При значении сигнала W/R=0 информация с ячейки памяти M_{ij} преобразуется к однофазному виду, усиливается буферами ввода и подается на шину DO. При значении сигнала W/R=1 информация считывается с шины DI, преобразуется к парафазному виду, усиливается буферами ввода B_1, B_3 и записывается в ячейку памяти. Информация хранится в стандартной ячейке памяти статического типа на шести транзисторах с напряжением питания 5 В. Схема и топология ячеек памяти приведены в [10].

Топологии тестовых структур и схемы управления

Экспериментальные измерения проводились на тестовых структурах транзисторов, промышленно изготовленных по технологии с разрешающей способностью 2 мкм. При моделировании КНИ МОП-транзисторов импульсно-амплитудного модулятора были получены следующие значения параметров.

Как видно из табл. 2, импульсно-амплитудный модулятор обеспечивает линейное регулирование автоэмиссионного тока микроэлектрода в интервале 3 нА — 3 мкА при изготовлении транзисторов по технологии с разрешающей способностью 0,6 мкм. Такой интервал тока определен для значений напряженности поля, учитывающих плотность поверхностных состояний и скорость насыщения электронов в кремнии. Топология тестовых структур транзисторов импульсно-амплитудного модулятора VT1—VT8 без контактных площадок для технологии с разрешающей способностью 0,6 мкм показана на рис. 8.

Таблица 2

Параметры транзисторов VT1—VT8

Транзистор	W/L, мкм	I_c , мкА	V_{th}/V_c , В
VT1	0,6/0,6	0,012	1,5/5
VT2	1,2/0,6	0,023	1,5/5
VT3	2,4/0,6	0,047	1,5/5
VT4	4,8/0,6	0,094	1,5/5
VT5	0,6/4,8	0,189	2,0/5
VT6	0,6/2,4	0,376	2,0/5
VT7	0,6/1,2	0,742	2,0/5
VT8	0,6/0,6	1,503	2,0/5

Примечание. Область канала транзисторов легирована бором с концентрацией $2,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

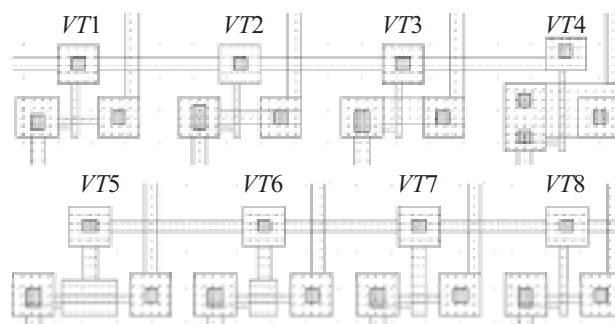


Рис. 8. Топология тестовых структур транзисторов импульсно-амплитудного модулятора

Для согласования напряжения выходных сигналов ячеек памяти и управляющего напряжения на затворах транзисторов импульсно-амплитудного модулятора исследовались делители напряжения на областях поликремния и диффузии n^+ -, p^+ -типов. Топология делителей напряжения показана на **рис. 9**, а тестовая структура областей диффузии — на **рис. 10**.

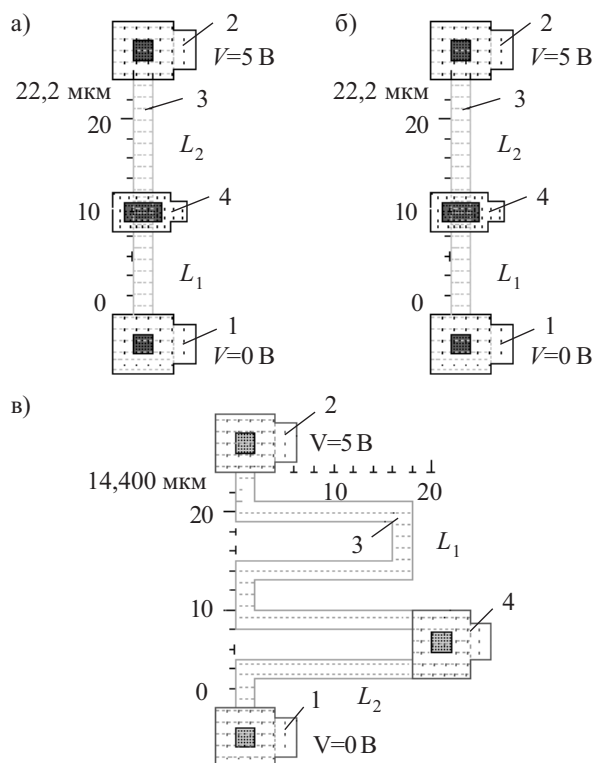


Рис. 9. Топология делителей напряжения на областях:
а — n^+ -диффузии ($R=93,7 \text{ Ом/к}$); б — p^+ -диффузии ($R=78,1 \text{ Ом/к}$);
в — поликремния ($R=35 \text{ Ом/к}$)
1 — земля; 2 — питание; 3 — резистор; 4 — выход делителя

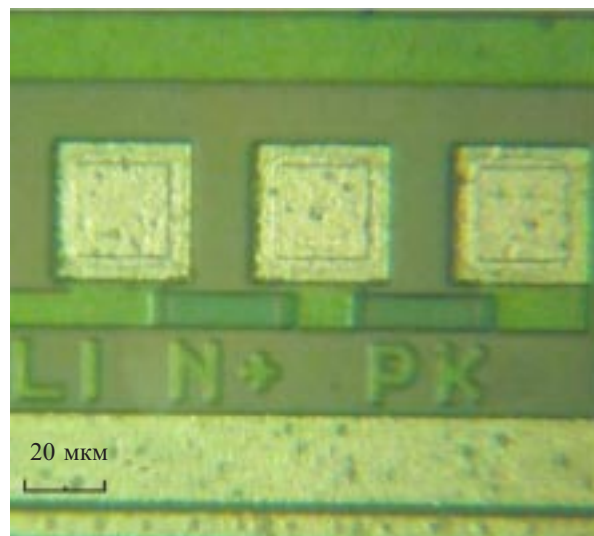


Рис. 10. Тестовая структура:
 N^+ — область n^+ -диффузии; PK — область рекристаллизованного кремния

Для делителей напряжения были выбраны области диффузии n^+ -типа, т. к. они имели наибольшее удельное сопротивление.

С использованием топологии тестовых структур была разработана топология микроатода, интегрированного с высоковольтным КНИ МОП-транзистором, импульсно-амплитудным модулятором, ячейками памяти и буферами ввода/вывода (**рис. 11**).

Топология микроатода, интегрированного со схемой управления, может мультиплицироваться как по оси OX , так и по оси OY для получения матриц большого размера на одной кремниевой пластине. Такая неподвижная пластина, установленная с небольшим углом поворота относительно перемещения экспонируемой пластины с резистом, выполняет функцию

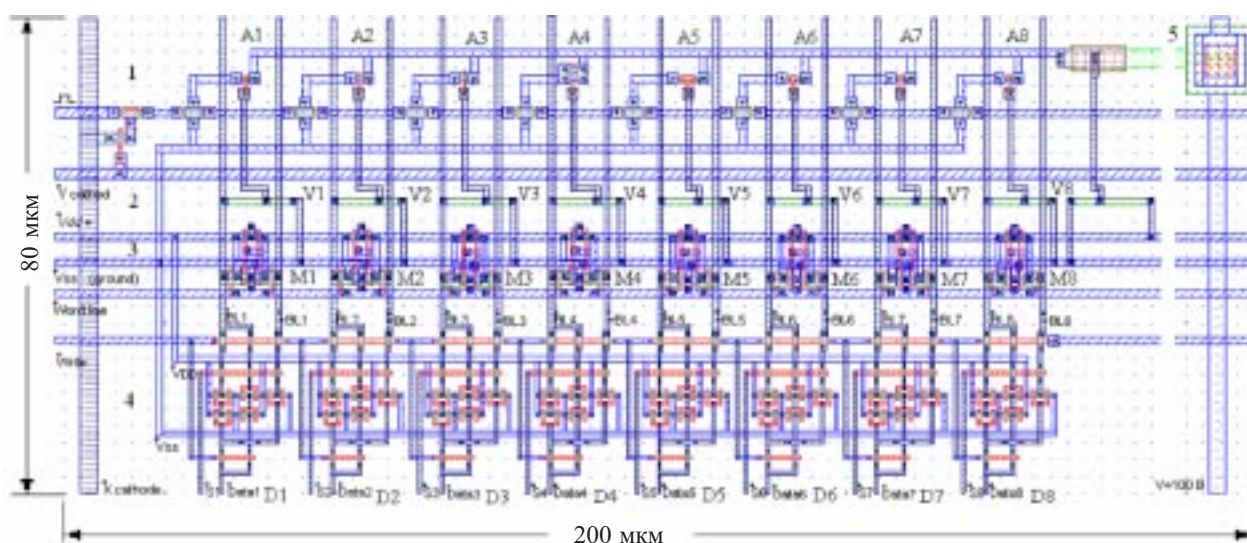


Рис. 11. Топология микроатода, интегрированного со схемой управления:
1 — 8-разрядный импульсно-амплитудный модулятор; 2 — делители напряжения; 3 — ячейки памяти; 4 — буферы ввода/вывода ячеек памяти; 5 — микроатод

программируемого фотошаблона в цифровой электронной литографии.

Заключение

Проведенные исследования позволили установить область применения компактной EKV-модели МОП-транзистора для расчета характеристик КНИ МОП-транзисторов. Расчетные характеристики сравнивались с экспериментальными выходными характеристиками КНИ МОП-транзистора, в котором подканальная область соединена с истоком. Разработанная схема управления кремниевым микрокатодом обеспечивает линейное регулирование автоэмиссионных токов в интервале 3 нА—3 мкА при напряжении на электродах 100 В. Спроектирована топология микроатода, интегрированного со схемой управления, которую можно мультиплицировать в матрицы больших размеров. Полученные результаты показывают, что матрицы управляемых автоэмиссионных кремниевых микрокатодов могут использоваться в качестве программируемых фотошаблонов в цифровой электронной литографии с субмикронным разрешением.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Colinge J. P. Silicon-on-insulator technology: Materials to VLSI.— Norwell (Ma, USA): Kluwer Academic Publishers, 1997.

2. Пат. 36463 України. Спосіб виготовлення локальних тривимірних структур «кремній-на-ізоляторі» / І. Т. Когут, В. І. Голота, А. О. Дружинін, С. В. Сапон.— 27.10.08.

3. Пат. 29698 України. Ключовий елемент на діодах Шоттки з структурами «кремній-на-ізоляторі» / І. Т. Когут, В. І. Голота, А. О. Дружинін.— 25.01.08.

4. Пат. 29701 України. Контакт в інтегральних пристроях зі структурою «кремній-на-ізоляторі» / І. Т. Когут, А. О. Дружинін, В. І. Голота.— 25.01.08.

5. Druzhynin A., Holota V., Kohut I. et al. The device-technological simulation of the field-emission micro-cathodes based on three-dimensional SOI-structures // Electrochemical Society Trans.— 2008.— Vol. 14, N 1.— P. 569.

6. Gildenblat G., Zhu Z., McAndrew C. C. Surface potential equation for bulk MOSFET / Solid-State Electronics.— 2009.— Vol. 53, N 1.— P. 11—13.

7. Bucher M., Lallement C., Enz C. et al. The EPFL-EKV MOSFET model equations for simulation.— EPFL, Lausanne, Switzerland: Technical Report. Model Version 2.6.— 1997.— P. 18.

8. Angelov G. V., Asparuhova K. K. Optimization and simulation of the EKV model using MatLab // Conf. “Electronics 2007”. Book 1.— Sozopol (Bulgaria).— 2007.— P. 19—21.

9. Collinge J. P., Park J. T. Application of the EKV model to the DT MOS SOI transistor // J. of semiconductor and science.— 2003.— Vol. 3, N 4.— P. 223—226.

10. Дружинин А. А., Голота В. И., Когут И. Т. и др. Приборно-технологическое моделирование автоэмиссионных кремниевых микрокатодов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2008.— № 5.— С. 43—49.

К. ф.-м. н. Н. Б. ГОРЕВ, к. ф.-м. н. И. Ф. КОДЖЕСПИРОВА,
к. ф.-м. н. Е. Н. ПРИВАЛОВ

Украина, г. Днепрпетровск, Институт технической механики
E-mail: gorev57@mail.ru

Дата поступления в редакцию
18.09 2009 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Д. В. КОРБУТЯК
(ИФП им. В. Е. Лашкарева, г. Киев)

ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ GaAs

Предложен метод измерения вольт-фарадных характеристик полупроводниковых структур с участками крутого падения с использованием измерительного переменного напряжения умеренно малых амплитуд.

Вольт-фарадные методы определения параметров полупроводниковых структур просты и удобны. Однако в таком практически важном случае как тонкопленочные эпитаксиальные структуры GaAs, которые широко используются в современной микроэлектронике, их применение сопряжено с трудностями. Это связано с тем, что в этих структурах на границе «пленка—подложка» имеется область встроенного объемного заряда, образование которой обусловлено резким градиентом концентрации легирующей примеси в сочетании с наличием незаполненных глубоких центров захвата в полуизолирующей компенсированной подложке [1]. Смыкание этой области с областью объемного заряда барьера Шоттки приводит к невозможности переноса на тонкопленочные эпитаксиаль-

ные структуры вольт-фарадных методов, разработанных для объемных полупроводников [2, 3]. Кроме того, сложной задачей может быть и само проведение вольт-фарадных измерений, поскольку это же смыкание приводит к резкому падению барьерной емкости с ростом напряжения на барьере Шоттки [1]. Поэтому для того, чтобы измеренная барьерная емкость совпадала с фактической, амплитуда переменного напряжения, прикладываемого к барьеру Шоттки для измерения емкости, должна быть весьма малой. Измерения же на таких малых амплитудах могут быть затруднены, в частности, вследствие шума.

В данной работе предлагается метод, позволяющий измерять вольт-фарадные характеристики с участками крутого падения при помощи переменного напряжения умеренно малых амплитуд (порядка 100 мВ), на которых работают стандартные измерители емкости.

Общепринятая процедура измерения зависимости барьерной емкости C от величины постоянного напряжения V_{DC} на барьере Шоттки заключается в следующем: к барьеру прикладывается малое перемен-

ное напряжение $\tilde{V} = V_{AC} \sin \omega t$, где V_{AC} и ω — амплитуда и круговая частота переменного напряжения, t — время; измеряется амплитуда I_{AC} переменного тока $\tilde{I}$ через барьерную емкость (тока смещения), и соответствующая постоянному напряжению V_{DC} барьерная емкость находится по формуле

$$C = \frac{1}{\omega} \frac{I_{AC}}{V_{AC}}. \quad (1)$$

Однако формула (1) дает фактическую емкость только в случае, когда ток $\tilde{I}$ также является синусоидальным. Если же это не так, то емкость, вычисленная по формуле (1), отличается от фактической. Действительно, в общем случае связь между током смещения и барьерной емкостью определяется выражением, которое легко получить из определения барьерной емкости как производной заряда барьера Шоттки по напряжению:

$$\tilde{I} = C(V) \frac{dV}{dt}, \quad (2)$$

где V — мгновенное значение напряжения на барьере Шоттки; $C(V)$ — соответствующее этому напряжению мгновенное значение барьерной емкости.

Разлагая $C(V) = C(V_{DC} + V_{AC} \sin \omega t)$ в ряд по степеням V_{AC} , выражение для тока смещения (2) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \tilde{I} = \omega V_{AC} \left[C(V_{DC}) + \frac{1}{8} C''(V_{DC}) V_{AC}^2 \right] \cos \omega t + \\ + \frac{1}{2} \omega C'(V_{DC}) V_{AC}^2 \sin 2\omega t - \\ - \frac{1}{8} \omega C''(V_{DC}) V_{AC}^3 \cos 3\omega t + O(V_{AC}^4), \end{aligned} \quad (3)$$

где штрихи обозначают дифференцирование.

Отсюда видно, что в общем случае ток $\tilde{I}$ не является гармоническим. Как правило, измерительная цепь выделяет только первую гармонику тока $\tilde{I}$, и поэтому входящая в формулу (1) амплитуда I_{AC} представляет собой амплитуду первой гармоники I_1 . Из (3) следует, что с точностью до величины $O(V_{AC}^4)$ она равна

$$I_1 = \omega V_{AC} \left[C(V_{DC}) + \frac{1}{8} C''(V_{DC}) V_{AC}^2 \right],$$

и поэтому формула (1) определяет кажущуюся емкость C_{ap} , которая связана с фактической емкостью $C(V_{DC})$, следующим образом:

$$C_{ap} = C(V_{DC}) + \frac{1}{8} C''(V_{DC}) V_{AC}^2. \quad (4)$$

Очевидно, для того чтобы кажущаяся емкость C_{ap} была близка к фактической емкости $C(V_{DC})$, амплитуда напряжения V_{AC} должна удовлетворять условию $V_{AC}^2 \ll C(V_{DC}) / |C''(V_{DC})|$. Однако из выражения (4) следует, что емкость $C(V_{DC})$ может быть определена

другим способом, при котором выполнения приведенного условия не требуется. Действительно, можно измерить емкость C_{ap} при двух амплитудах — V_{AC1} и V_{AC2} — и затем найти $C(V_{DC})$ из полученной при подстановке этих данных в (4) системы двух уравнений, т. е.

$$C(V_{DC}) = C_{ap}(V_{AC1}) + \frac{C_{ap}(V_{AC1}) - C_{ap}(V_{AC2})}{(V_{AC2}/V_{AC1})^2 - 1}. \quad (5)$$

В некоторых случаях для определения параметров полупроводниковых структур и приборов на их основе используется вольт-фарадная характеристика с точкой перегиба (например, для определения концентрации незаполненных глубоких центров вблизи границы «пленка—подложка» [4], прогнозирования напряжения отсечки полевого транзистора [5], определения параметров полупроводниковых детекторов гамма-излучения [6]). Поскольку в точке перегиба вторая производная обращается в ноль, из (4) следует, что эту точку можно найти как точку пересечения кривых кажущейся емкости, измеренных при различных значениях амплитуды V_{AC} . Такой метод определения точки перегиба не требует двойного численного дифференцирования измеренной вольт-фарадной зависимости, которое может давать значительные погрешности.

Для проверки возможности определения фактической емкости описанным выше методом рассчитаем зависимость кажущейся емкости эпитаксиальной структуры GaAs от амплитуды переменного напряжения V_{AC} , найдем из этой зависимости фактическую емкость как предельное значение кажущейся емкости при уменьшении V_{AC} и сравним ее с емкостью, рассчитанной по формуле (5).

Из (1) и (2) вытекает, что кажущуюся емкость можно представить в виде

$$C_{ap}(V_{DC}) = \epsilon \epsilon_0 S \frac{E_{b1}}{V_{AC}},$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

ϵ_0 — диэлектрическая постоянная;

S — площадь барьерного контакта;

E_{b1} — амплитуда первой гармоники переменной составляющей $\tilde{E}_b$ электрического поля E_b на границе «металл—полупроводник» при приложенном к барьеру Шоттки напряжении $V = V_{DC} + V_{AC} \sin \omega t$.

Таким образом, для расчета кажущейся емкости надо знать зависимость $E_b(V)$. Поскольку эпитаксиальные структуры GaAs содержат глубокие центры захвата в полуизолирующей подложке, зависимость $E_b(V)$ будет разной при разных частотах переменного напряжения. В предельном случае будем считать, что частота переменного напряжения настолько высока, что глубокие центры не успевают перезарядаться при изменении напряжения, и тогда

$$E_b(V) = E_b(V_{DC} + V_{AC} \sin \omega t) \Big|_{n_t = n_t(V_{DC})},$$

где n_t — концентрация захваченных носителей.

Рассмотрим эпитаксиальную структуру, состоящую из низкоомной пленки толщиной h с контактом

типа барьера Шоттки и полужолирующей компенсирующей подложки бесконечной толщины. Пленка содержит только мелкие доноры с концентрацией N_d , а подложка — мелкие доноры и компенсирующие их глубокие электронные центры захвата акцепторного типа с концентрацией N_s и N_p , соответственно. Зафиксируем начало координат на границе «пленка—подложка» и направим ось ОХ перпендикулярно пленке в подложку.

Пусть к барьеру Шоттки приложено обратное напряжение V_{rev} . Распределение электрического поля E и концентрации свободных носителей n в данной структуре описывается уравнением Пуассона

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} \begin{cases} n - N_d & \text{при } x < h \\ n + n_t - N_s & \text{при } x > h \end{cases} \quad (6)$$

и уравнением непрерывности тока, которое в рамках диодной теории барьера Шоттки имеет вид

$$\frac{dn}{dx} = \frac{q}{kT} nE, \quad (7)$$

где x — координата вдоль оси ОХ;
 q — заряд электрона;
 k — постоянная Больцмана;
 T — абсолютная температура.

Тогда концентрация захваченных носителей определяется как

$$n_t = \begin{cases} N_t \frac{n}{n + n_1} & \text{при } V_{rev} = V_{DC}; \\ n_t(V_{DC}) & \text{при } V_{rev} = V_{DC} + V_{AC} \sin \omega t, \end{cases} \quad (8)$$

где n_1 — зависящий от глубины центров параметр Шокли–Рида, который равен концентрации свободных электронов в зоне проводимости, когда энергетический уровень глубокого центра совпадает с уровнем Ферми.

Функции E и n непрерывны в точке $x=h$:

$$E(h-0) = E(h+0), \quad n(h-0) = n(h+0)$$

и удовлетворяют следующему граничному условию в глубине подложки:

$$E \rightarrow 0 \Leftrightarrow n \rightarrow n_{sub}, \quad (9)$$

где n_{sub} — концентрация свободных носителей в глубине подложки, связанная с N_p , N_s и n_1 условием электронейтральности

$$n_{sub} + N_t \frac{n_{sub}}{n_{sub} + n_1} = N_s.$$

В рамках диодной теории барьера Шоттки граничное условие на границе «металл—полупроводник» имеет вид

$$V_{rev} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{n(0)} - \Phi_b/q, \quad (10)$$

где N_c — эффективная плотность состояний в зоне проводимости;
 Φ_b — высота барьера Шоттки.

Таким образом, для получения искомой зависимости $E_b(V_{DC} + V_{AC} \sin \omega t)$ необходимо решить краевую задачу (6), (7), (9), (10).

Представим E и n при обратном напряжении ($V_{DC} + V_{AC} \sin \omega t$) в виде $E = E_0 + \delta E$, $n = n_0 + \delta n$, где E_0 , n_0 — решение системы (6), (7) при обратном напряжении V_{DC} .

С учетом (8), линеаризация уравнений (6), (7) дает

$$\frac{d}{dx} \delta E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} \delta n, \quad (11)$$

$$\frac{d}{dx} \delta n = \frac{q}{kT} (n_0 \delta E + E_0 \delta n). \quad (12)$$

Линеаризованные граничные условия (9), (10) принимают вид

$$\delta E \rightarrow 0 \Leftrightarrow \delta n \rightarrow 0, \quad (13)$$

$$V_{AC} \sin \omega t = - \frac{kT}{q} \frac{\delta n(0)}{n_0(0)}. \quad (14)$$

Если известны E_0 и n_0 , то численное решение линейной краевой задачи (11)–(14) может быть получено стандартными неитерационными методами, например методом суперпозиции [7].

Найдем E_0 и n_0 . Как следует из (8), при $V_{rev} = V_{DC}$ из уравнений (6), (7) можно исключить координату x , что дает

$$\frac{dE_0}{dn_0} = \frac{kT}{\epsilon\epsilon_0} \frac{n_0 + N_t n_0 / (n_0 + n_1) - N_s}{n_0 E_0}.$$

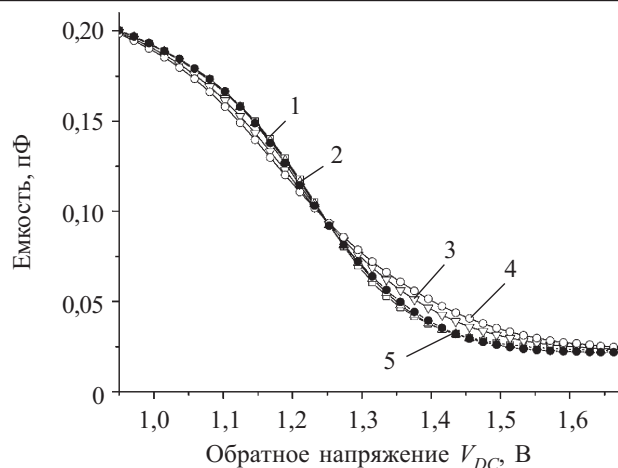
Это уравнение легко интегрируется в аналитическом виде, что позволяет выразить концентрацию свободных носителей n_0 и электрическое поле E_0 в плоскости перехода «пленка—подложка» через напряжение V_{DC} в параметрическом виде, где параметром является максимальная концентрация n_m свободных носителей в пленке [8]:

$$n_{0j} = n_m \left(\frac{n_{sub}}{n_m} \right)^{\frac{N_t - N_s}{N_d + N_t - N_s}} \left(\frac{N_t}{N_s} \right)^{\frac{N_t}{N_d + N_t - N_s}} \times \\ \times \exp \left(- \frac{n_m}{N_d + N_t - N_s} \right);$$

$$E_{0j} = - \frac{\sqrt{2} kT}{q l_d} \left(n_{0j} - n_m + \ln \frac{n_m}{n_{0j}} \right)^{1/2};$$

$$V_{DC} = \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{N_c}{n_m} + \frac{n_m}{N_d} + A^2 \right) - \Phi_b/q;$$

$$A = \frac{h}{\sqrt{2} l_d} + 2 \left(\ln 3 - \frac{n_m}{N_d} \right)^{1/2} -$$



Измеренная кажущаяся барьерная емкость структуры (1—4) и рассчитанная фактическая емкость (5) при различных значениях амплитуды V_{AC} (в мВ): 1 — 20; 2 — 40; 3 — 100; 4 — 130; 5 — 100 и 130

$$-\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1+2p}} \ln \frac{(\sqrt{1+3p} + \sqrt{1+2p})^2}{p} - \left(\ln \frac{n_m}{n_{0j}} - \frac{n_m}{N_d} \right)^{1/2};$$

$$p = 1 - \frac{n_m}{N_d},$$

где $l_d = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 k T}{q^2 N_d}}$ — дебаевская длина в пленке.

Зная E_{0j} и n_{0j} , функции $E_0(x)$ и $n_0(x)$ можно найти численным интегрированием уравнений (6) и (7) с начальными условиями

$$E_0(h) = E_{0j}, \quad n_0(h) = n_{0j}.$$

На рисунке представлены результаты расчета барьерной емкости для типичной эпитаксиальной структуры GaAs ($h=0,2$ мкм; $S=300$ мкм²; $N_d=10^{17}$ см⁻³; $N_s=5 \cdot 10^{16}$ см⁻³; $N_s=5 \cdot 10^{15}$ см⁻³; $n_{sub}=10^9$ см⁻³; $\phi_b=0,8$ эВ; $T=300$ К). Для наглядности приведен только участок резкого падения емкости, на котором зависимость кажущейся емкости от амплитуды измерительного переменного напряжения выражена наиболее ярко.

Отметим, что все кривые пересекаются в одной точке, а именно — в точке перегиба, как и должно быть

в соответствии с формулой (4). Кривые 1 и 2 для $V_{AC}=20$ и 40 мВ совпадают, т. е. емкость, измеренная на этих амплитудах, является фактической. Емкость же, измеренная при $V_{AC}=100$ и 130 мВ, заметно отличается от фактической (кривые 3 и 4). Емкость, найденная для $V_{AC}=100$ и 130 мВ по формуле (5) (кривая 5), практически совпадает с фактической.

Таким образом, предложенный метод измерения позволяет повысить амплитуду переменного напряжения, обеспечивающую измерение фактической емкости, в несколько раз по сравнению с общепринятой методикой измерения.

Вольт-фарадные характеристики эпитаксиальных структур GaAs, имеющие участки резкого падения, могут быть измерены с достаточной точностью с применением обычно используемых амплитуд измерительного переменного напряжения (порядка 100 мВ) за счет проведения измерений на двух различных амплитудах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Костылев С. А., Прохоров Е. Ф., Уколов А. Т. Явления токопереноса в тонкопленочных арсенид-галлиевых структурах. — Киев: Наукова думка, 1990.
2. Lehovec K. C-V analysis of a partially depleted semiconducting channel // Applied Physics Letters. — 1975. — Vol. 26, N 3. — P. 82—84.
3. Хучуа Н. П., Хведелидзе Л. В., Тигишвили М. Г. и др. Роль глубоких уровней в технологии арсенида галлия // Микроэлектроника. — 2003. — Т. 32, № 5. — С. 323—343.
4. Gorev N. B., Kodzhespriova I. F., Privalov E. N. et al. Non-destructive deep trap diagnostics of epitaxial structures // Solid-State Electronics. — 2003. — Vol. 47, N 9. — P. 1569—1575.
5. Горев Н. Б., Коджеспирова И. Ф., Привалов Е. Н. Прогнозирование напряжения отсечки ионно-имплантированных полевых транзисторов с барьером Шоттки на GaAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 6. — С. 3—5.
6. Bocek G. L., Kulibaba V. I., Maslov N. I. et al. Silicon pad detectors for a simple tracking system and multiplicity detectors creation // Problems of Atomic Science and Technology. — 2001. — N 1. — P. 36—39.
7. На Ц. Вычислительные методы решения прикладных граничных задач. — М.: Мир, 1982.
8. Gorev N. B., Kodzhespriova I. F., Privalov E. N. et al. Photocapacitance of GaAs thin-film structures fabricated on a semi-insulating compensated substrate // International Journal of High Speed Electronics and Systems. — 2004. — Vol. 14, N 3. — P. 775—784.

НОВЫЕ КНИГИ

Нефедов Е. И. Устройства СВЧ и антенны. — М.: Академия, 2009. — 384 с.

В учебном пособии изложены основы функционирования устройств СВЧ и антенн, описаны аналитические и численные методы их расчета и проектирования. Главное внимание уделено физическим принципам работы устройств и протекающих в них процессов. Рассмотрены типовые линии передачи, базовые элементы и функциональные узлы антенно-волноводных систем, их физические, математические и электрические модели. Для студентов учреждений высшего профессионального образования.



К. т. н. Ю. Н. БОБРЕНКО, Н. В. ЯРОШЕНКО, Г. И. ШЕРЕМЕТОВА,
к. т. н. Т. В. СЕМИКИНА, к. ф.-м. н. Б. С. АТДАЕВ

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

Дата поступления в редакцию
07.09 2009 г.

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

ФОТОПРИЕМНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ZnS

Исследовалась чувствительность тонкопленочных фотоприемников на основе ZnS в ультрафиолетовой и видимой области спектра при низких уровнях облучения. Показано, что оптимизацией толщины переходного слоя $(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}$ можно значительно уменьшить длинноволновую чувствительность.

Практический интерес к новым полупроводникам, служащим для регистрации и измерения ультрафиолетового излучения, возник в последние десятилетия, когда особо острой стала проблема уменьшения озонового слоя и загрязнения окружающей среды. Развитие биологии, медицины, сенсорной техники и др. дало импульс к разработкам новых фотоприемников (ФП) УФ-излучения на основе широкозонных полупроводников, таких как GaN, AlGaIn, ZnO, ZnS, SiC [1]. Особый интерес представляют фотоприемники, «слепые» к видимому излучению.

В работе рассматриваются тонкопленочные ФП на основе гетероперехода $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-ZnS}/(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}/\text{CdSe}/\text{Mo}$. Слои ZnS и CdSe были получены методом термического испарения в квазизамкнутом объеме и осаждения конденсата на металлизированную ситалловую подложку. Барьерообразующий слой $\text{Cu}_{1,8}\text{S}$ (с концентрацией носителей заряда $N_a \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$) также наносился методом термического испарения в вакууме на поликристаллическую тонкопленочную многослойную структуру ZnS/CdSe/Mo. Прямозонный полупроводник CdSe использовался для создания омического контакта к ZnS и ориентирующего действия на осаждаемый конденсат ZnS с целью получения совершенных слоев, близких к эпитаксиально выращенным пленкам. Осаждение базовых слоев CdSe и ZnS, а также образующихся при смене полупроводников неизбежных переходных слоев происходило в едином технологическом цикле.

Выбирая параметры газодинамического потока пара в реакторе, устанавливали такой режим, чтобы реакция



не смещалась вправо при смене слоев. Для этой цели использовались два патрубка на дне камеры и тепловые затворы.

Выбирая определенные режимы осаждения, можно получить как переходные слои толщиной в несколько постоянных кристаллической решетки, так и слои, толщина которых сравнима с толщиной фоточувствительного полупроводника (будем называть их соответственно тонкими и толстыми варизонными слоями).

Для создания эффективных ФП УФ-излучения использовались поликристаллические слои CdSe со столбчатой структурой. Величина кристаллитов находилась в пределах 0,5—2 мкм. Проводимость слоев зависела только от концентрации собственных дефектов, специальное легирование не применялось. Концентрация носителей в базовом слое CdSe определялась по вольт-фарадным характеристикам и находилась в пределах $N_d = 10^{12} \text{—} 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Таким образом были получены ФП как с низкоомной, так и с высокоомной базой.

Основная особенность полученных тонкопленочных ФП — это использование барьера вблизи поверхности, глубина залегания которого менее 50 нм. В рассматриваемых приемниках, как и в диодах Шоттки, верхним барьерным слоем служит не металл, а сильновырожденный сульфид меди $\text{Cu}_{1,8}\text{S}$. Наличие барьера у поверхности уменьшает скорость поверхностной рекомбинации, ослабляет негативное влияние малого времени жизни носителей. Требования к ФП, работающим со слабыми сигналами, определяются пороговыми характеристиками, а именно: малыми шумами, малым темновым током I_s , низкой чувствительностью к нежелательным сигналам, например к фотоэмиссии из металла или сильновырожденного полупроводника, к токам, обусловленным двойными переходами, и т. д.

Особый интерес в данной работе представляют образцы с низкоомной базой, т. к. они слабочувствительны к видимому свету. В то же время, образцы с высокоомной базой обладают рядом уникальных свойств: имеют две области чувствительности — УФ и видимую, но в то же время — большое значение отношения темнового тока к току при видимом излучении, а также S-образное дифференциальное сопротивление и др.

Фотоприемники на основе гетероперехода $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-ZnS}/(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}/\text{CdSe}/\text{Mo}$ эффективны при низких уровнях освещенности. Основным критерием эффективности служит отношение сопротив-

ления базы R_s к дифференциальному сопротивлению R_d . С целью выяснения влияния R_s на характеристики ФП запишем основное уравнение фотодиода при работе в фотовентильном режиме с учетом большого шунтирующего сопротивления ($R_{sh} \rightarrow \infty$) в виде

$$I_{ph} = I_L - I_s \{ \exp[\beta(U + I_{ph}R_s)] - 1 \}, \quad (2)$$

где I_{ph} — фототок через нагрузочное сопротивление R ;
 I_L — фототок, соответствующий количеству поглощенных приемником фотонов;
 I_s — темновой ток;
 β — приведенный термический потенциал, $\beta = q/(AkT)$;
 A — параметр неидеальности диода;
 T — температура;
 U — напряжение на диоде.

В случае слабых сигналов при условии $(U + I_{ph}R_s) \ll q/(AkT)$, разлагая экспоненту в ряд и ограничиваясь первыми двумя членами, получим

$$I_{ph} = I_L - I_s \beta (U + I_{ph}R_s) \quad (3)$$

или

$$I_{ph}(1 + I_s \beta R_s) = I_L - I_s \beta U.$$

Так как величина R_s слабо влияет на характеристики ФП при условии $I_s \beta R_s \ll 1$, можно записать $R_s \ll 1/(I_s \beta)$, а с учетом $1/(I_s \beta) = R_d$ получим $R_s \ll R_d$.

Используя характеристики ФП $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-ZnS}/\text{CdSe}/\text{Mo}$: площадь образца 5 мм^2 , $I_s = 10^{-7} \text{—} 10^{-8} \text{ А/см}$, $\beta \approx 20$ (в нашем случае $A=2$, $T=300 \text{ К}$), получим $R_s \ll 10^5 \text{—} 10^6 \text{ Ом}$.

Слой с $R_s < 10^3 \text{ Ом}$ слабо влияют на характеристики ФП при выбранных условиях.

Толщина W слоя ZnS определялась по коэффициенту поглощения УФ-излучения α и диффузионной длине пробега неосновных носителей L_p . При $\alpha = 10^5 \text{—} 0,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ основная часть УФ-излучения поглощается в слое толщиной $W \approx 20 \text{—} 100 \text{ нм}$. Следовательно в слое толщиной $W=300 \text{ нм}$ будет поглощаться практически все УФ-излучение. При $W > 300 \text{ нм}$ будем считать слой ZnS толстым, а при $W < 300 \text{ нм}$ — тонким.

В работе исследовались ФП с тонким слоем ZnS и низкоомной базой (критерий низкоомности — $R < 10^3 \text{ Ом}$). На рис. 1 показаны две энергетические зонные диаграммы (ЭЗД) фотоприемников $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-ZnS}/\text{CdSe}/\text{Mo}$ с тонким (а) и толстым (б) варизонным слоем.

$\text{Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-ZnS}/(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}/\text{CdSe}/\text{Mo}$ с толстым и тонким варизонным слоем $(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}$. Диаграммы не отображают всех физических процессов, в частности, на рис. 1, а не показан неизбежный из-за технологических особенностей варизонный тонкий слой между ZnS и CdSe (меньше 10 нм). Варизонные слои уменьшают дефектность структуры на границе раздела, вызванную различием параметров решеток. Меняя состав $(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}$, можно добиться наращивания фоточувствительного слоя, близкого к эпитаксиальному. Основным показателем фотоэмиссии дырок из CdSe служит разрыв валентной зоны ΔE_v (рис. 1, а), равный 0,6 эВ [2], и туннелирование дырок через треугольный барьер между CdSe и ZnS (рис. 1, б). При соответствующих режимах осаждения были получены образцы с тонкими (в несколько нм) и толстыми варизонными слоями.

В тонкий слой вносится заведомо «дефектная» структура, где дефекты вызваны несовпадением параметров решеток, температурных коэффициентов расширения слоев, которая создает условия для рекомбинации фотоносителей. На рис. 1, а показана ЭЗД с «дефектным» (тонким варизонным) слоем, где поток носителей в коротковолновой области разделяется сильным полем в ZnS. Фотоносители в длинноволновой области CdSe не смогут преодолеть потенциальный барьер для дырок и будут рекомбинировать на структурных дефектах границы раздела, а также в «кармане» для дырок, что показано на рисунке стрелками. Рис. 1, б отображает варизонный слой с менее «дефектной» структурой (нет потенциальной ямы для дырок). Часть дырок туннелирует через треугольный барьер в ZnS, поскольку высота его стала меньше. Толщина такого слоя может быть сопоставима с толщиной ZnS, широкий варизонный слой снижает тянущее поле и увеличивает R_s .

Подтверждением этому служит зависимость фоточувствительности от длины волны, показанная для двух образцов ФП площадью 5 мм^2 на рис. 2. Фототоки в точках максимальной чувствительности коротковолновой и длинноволновой областей отличаются для толстого и тонкого слоев соответственно на 2 и 3 порядка.

Отметим, что у ФП с тонким слоем несколько уменьшается фоточувствительность в УФ-области.

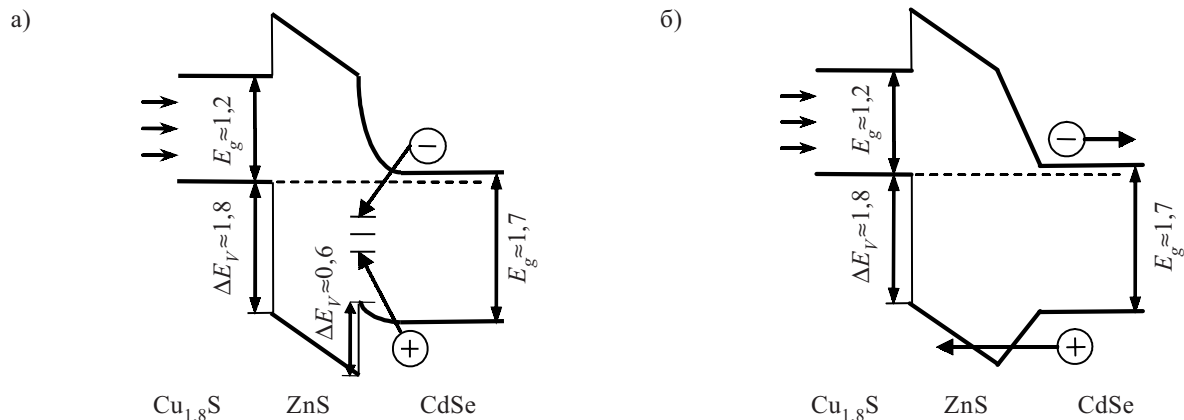


Рис. 1. Энергетические зонные диаграммы УФ ФП с тонким (а) и толстым (б) варизонным слоем

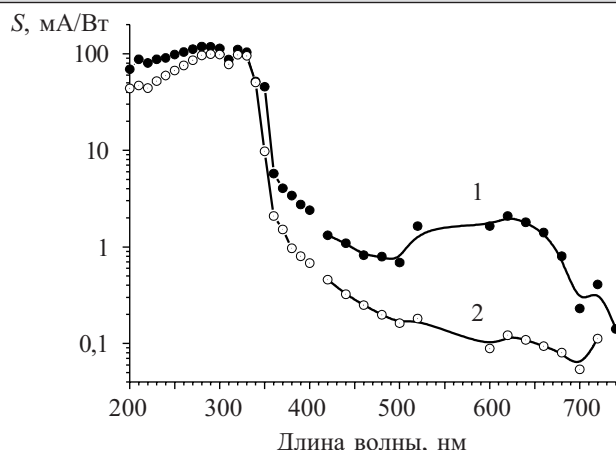


Рис. 2. Спектральная фоточувствительность S двух ФП с одинаковым слоем ZnS и варизонными слоями разной толщины:

1 — толстый; 2 — тонкий

Это объясняется увеличением рекомбинации в глубине слоя, поскольку введение варизонного слоя ослабляет электрическое поле в ZnS. С введением «дефектного» слоя фототок в длинноволновой области снижается на порядок.

Для тонкопленочных поликристаллических ФП с гетеропереходом $p\text{-Cu}_{1,8}\text{S}/n\text{-A}^2\text{B}^6$ характерно прохождение эмиссионных и туннельно-рекомбинационных токов [3], а при наличии высокоомных слоев ZnS при малых значениях напряжения и низкой температуре возможно появление и токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ). На рис. 3 показана ВАХ фотодиода при обратном смещении $U_{\text{обр}}$ и при комнатной температуре. В обратносмещенном диоде ток меньше в ФП с тонким варизонным слоем, в котором идет более интенсивная рекомбинация через состояния на границе раздела, облегчается туннельный захват электронов на состояния в запрещенной зоне. Токовая зависимость отражает типичный механизм ТОПЗ: $I = 9/8\epsilon\mu U^2/W^3$, где ϵ — диэлектрическая проницаемость ZnS; μ — подвижность носителей; W — толщина слоя ZnS. Ток, проходящий через тонкий слой, снижается на порядок, что подтверждает механизм прохождения тока, показанный на ЭЗД.

При увеличении напряжения проявляется туннельно-рекомбинационный механизм, кривая идет круче

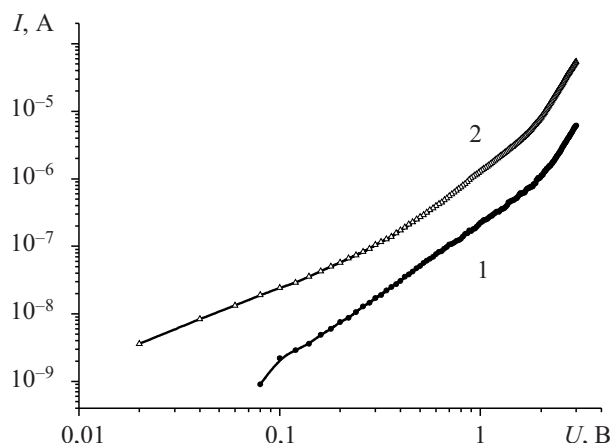


Рис. 3. Зависимость темнового тока от напряжения при обратном смещении фотодиода ($U_{\text{обр}} < 1,2$ В) для образцов ФП с варизонными слоями разной толщины:

1 — тонкий; 2 — толстый

в образце с тонким варизонным слоем. Ток I_s больше в ФП с толстым варизонным слоем, т. к. возрастает вероятность туннелирования через сниженный барьер.

Таким образом, изменяя толщину варизонного слоя, можно значительно уменьшить «нежелательную» длинноволновую чувствительность фотоприемника. Это важно при одновременном падении потоков слабого ультрафиолетового и сильного видимого излучения, поскольку позволяет обходиться без специальных фильтров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бланк Т. В. Гольдберг Ю. А. Полупроводниковые фотоэлектронпреобразователи для ультрафиолетовой области спектра // ФТП.— 2003.— Т. 37, вып. 9.— С. 1025—1055.
2. Su-Huai Wei, Alex Zunger. Calculated natural band offsets of all II-VI and III-V semiconductors: Chemical trends and the role of cation d orbitals // Appl. Phys. Lett.— 1998.— Vol. 72, N 16.— P. 2011—2013.
3. Павелец С. Ю., Бобренко Ю. Н., Комащенко А. В., Шенгелия Т. Е. Новая структура поверхностно-барьерного сенсора ультрафиолетового излучения на основе CdS // ФТП.— 2001.— Т. 35, вып. 5.— С. 626—628.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Барский А. Г. Оптико-электронные следящие системы.— М.: Логос, 2009.— 200 с.

Изложены теория, методы расчета и проектирования оптико-электронных следящих линейных и нелинейных систем, широко используемых при решении различных задач в области управления, прежде всего в военной технике. Даны методы их анализа и синтеза, учитывающие специфику систем пространственного слежения с модуляцией. Особое внимание уделено получению инженерных зависимостей для параметров звеньев систем с точки зрения обеспечения оптимальности их характеристик.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Оптотехника» и специальности «Оптико-электронные приборы и системы». Может быть полезна специалистам, занимающимся разработкой оптико-электронных следящих систем.



К. т. н. Я. Я. КУДРИК

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

Дата поступления в редакцию
22.09 2009 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ
(НИИ «Орион», г. Киев)

ИЗМЕРЕНИЯ ВАХ ИМПУЛЬСНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ЛПД НА УЧАСТКЕ ЛАВИННОГО ПРОБОЯ

Рассмотрены особенности измерения ВАХ импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов и использования их параметров для прогнозирования надежности ЛПД.

Известно, что из-за влияния заряда подвижных носителей при высокой плотности тока в кремниевых микроволновых диодах, в том числе лавинно-пролетных (ЛПД), возникает так называемое шнурование тока, которое зачастую является причиной катастрофических отказов ЛПД. На обратной ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) наблюдается область отрицательного дифференциального сопротивления [1, 2], что дает возможность прогнозировать отказы диодов по диагностике «шнурообразования» [3—5]. Особенно это актуально для мощных двух-пролетных ЛПД, которые работают в импульсном режиме. В данной работе рассмотрены некоторые методические аспекты измерения ВАХ подобных диодов, особенности их работы в импульсном режиме при высокой плотности обратного тока на участке развития лавинного пробоя.

Методика измерения ВАХ импульсных ЛПД

Схема измерения ВАХ ЛПД в импульсном режиме приведена на рис. 1. В эксперименте использованы тестовые импульсы длительностью 120 нс при амплитуде до 300 В на нагрузке 50 Ом. Импульс от генератора попадает на систему линий задержки. Линия задержки ЛЗ2 предназначена для разделения по времени падающего сигнала ($V_{\text{п}}$) и отраженного от исследуемого образца ($V_{\text{о}}$). Линия задержки ЛЗ4 разделяет отраженный и переотраженный от генератора импульсов сигнал. На линиях задержки ЛЗ1 и ЛЗ3 выделяются линейные комбинации падающего ($V_{\text{ак}}$) и отраженного ($V_{\text{вк}}$) импульсов, которые при определенном подборе нагрузок становятся пропорциональны импульсам напряжения V_x и тока I_x на исследуемом образце:

$$\begin{aligned} V_{\text{ак}} &= (V_{\text{п}} + V_{\text{о}})K_1 = K_1 V_x; \\ V_{\text{вк}} &= (V_{\text{пл}} - V_{\text{о}})K_2 = K_2 z I_x. \end{aligned} \quad (1)$$

где K_1, K_2 — коэффициенты пропорциональности, z — комплексная единица.

В нашем случае выбирается бесконечно большая нагрузка ЛЗ1 ($R_1 \rightarrow \infty$) и бесконечно малая нагрузка ЛЗ3 ($R_2 = 0$).

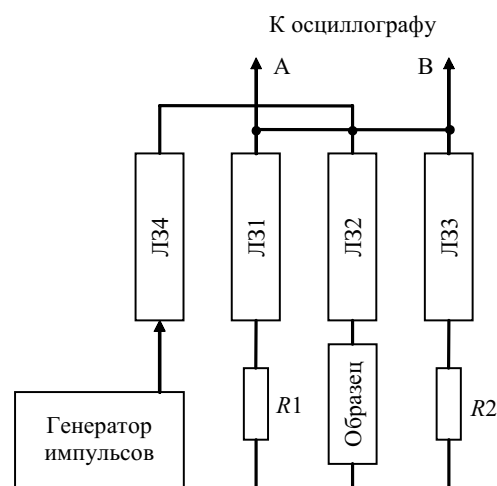


Рис. 1. Схема измерения ВАХ импульсных ЛПД

Результаты измерений и обсуждение

Рассмотрим детальнее «импульсную» ВАХ ЛПД и параметры, которые ее описывают. Общей чертой таких ВАХ является наличие участка отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), характеризующегося величиной критического тока $I_{\text{кр}}$. За участком с ОДС следует участок с очень малым дифференциальным сопротивлением (вертикальный участок), что характерно для расширения сформированного на участке ОДС «шнура» тока при постоянной плотности тока. Этот участок ярко выражен у диодов с «проколом» n -слоя, (рис. 2, кривые 1, 2) и хуже проявляется у диодов без «прокола» (кривая 3). Кроме того, ВАХ «проколотых» диодов отличаются еще и большим значением скачка напряжения ΔU на участке ОДС.

Ток в точке перехода ВАХ на участок ОДС определяется как критический. Как показали исследования, в зависимости от технологии изготовления ЛПД на его импульсной ВАХ может быть несколько точек перехода.

Измерения ВАХ ЛПД в импульсном режиме позволяют определить напряжение как однородного лавинного пробоя U_b , так и пробоя, связанного с микроплазмой. В этом случае импульсная ВАХ на участке пробоя не совпадает со статической. Для однородного лавинного пробоя значение U_b , измеренное импульсным методом, совпадает со значением, из-

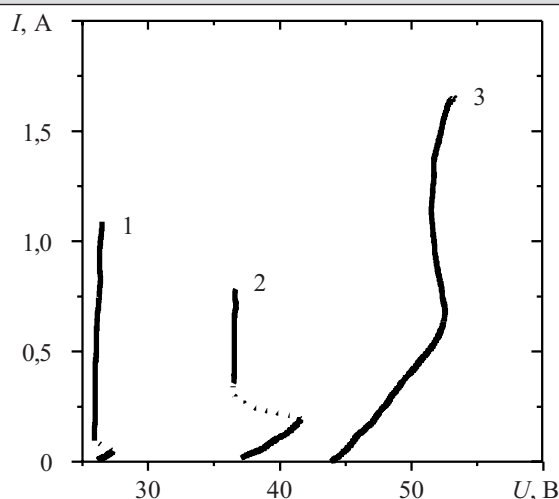


Рис. 2. ВАХ p^+-n-n^+ -диодов с проколом n -слоя (1, 2) и без прокола n -слоя (3)

меренным по производным ВАХ, и соответствует расчетному значению для резкого $p-n$ -перехода и барьера Шоттки

$$U_b = 60 \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{1,5} \left(\frac{N_b}{10^{16}} \right)^{-0,75}, \quad (2)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника;
 N_b — концентрация донорной примеси в базе.

На линейном участке импульсной ВАХ, который следует за участком с малым дифференциальным сопротивлением (рис. 3), можно определить импульсное дифференциальное сопротивление диода R_n . Измеряя низкочастотное дифференциальное сопротивление R_n , можно определить температуру перегрева участка « $p-n$ -переход—корпус» в низкочастотном режиме работы ЛПД:

$$T_{p-n} = P_{вх} R_t + T_{корп}, \quad (3)$$

где $P_{вх}$ — входная мощность;
 R_t — тепловое сопротивление участка « $p-n$ -переход—корпус», $R_t = \frac{R_n - R_n}{\beta U_b^2}$;

β — температурный коэффициент пробоя;
 $T_{корп}$ — температура корпуса.

Учитывая величину T_{p-n} и данные из [6—8], можно определить время t наработки на отказ ЛПД по формуле

$$\lg t = 10 - \frac{T_{p-n}}{40 [^\circ\text{C}]}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что каждое повышение температуры на 40°C уменьшает долговечность диода на порядок, и что для увеличения t необходимо уменьшить среднюю температуру $p-n$ -перехода. Анализ отказов ЛПД, работающих со сравнительно малыми величинами $I_{кр}$, после испытаний на надежность показал, что между количеством внезапных отказов диодов и величиной скачка напряжения на ВАХ ΔU существует корреляционная зависимость (рис. 4).

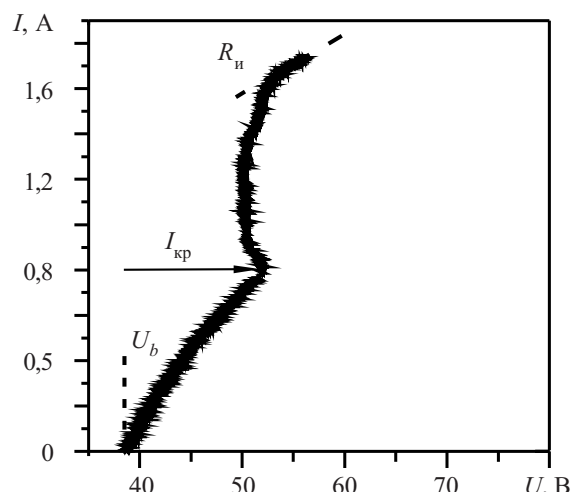


Рис. 3. ВАХ ЛПД в импульсном режиме

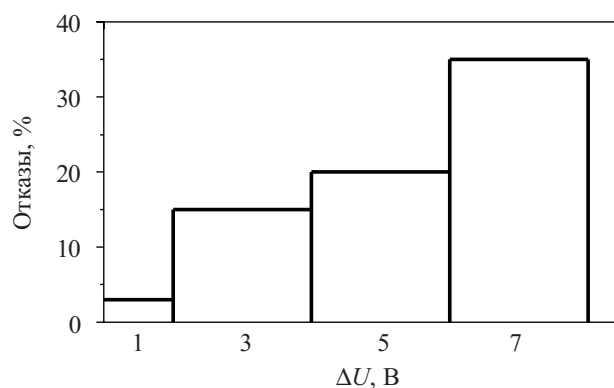


Рис. 4. Гистограмма зависимости относительного количества вышедших из строя диодов от величины ΔU

Полученные результаты необходимо учитывать при разработке физических методов прогнозирования надежности ЛПД и других типов микроволновых приборов, работающих в области лавинного пробоя $p-n$ -перехода или барьера Шоттки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Bowers H. S. Space-charge-induced negative resistance in avalanche diodes // IEEE Trans. Electron. Dev.— 1986.— Vol. ED-15, N 6.— P. 343—350.
2. Конакова Р. В., Мельникова Ю. С., Моздор Е. В., Файнберг В. И. Пробой кремниевых p^+-n-n^+ -диодов // ФТП.— 1988.— Т. 22, № 10.— С. 1754—1758.
3. Рапопорт А. Н., Файнберг В. И. Импульсные методы и средства контроля полупроводниковых приборов // Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания.— 1991.— № 3 (145).— С. 53—54.
4. Щербина Л. В., Торчинская Т. В. Шнурование тока в кремниевых p^+-n-n^+ -диодах // УФЖ.— 1983.— Т. 28, № 2.— С. 268—271.
5. Воронков И. Е., Ходневич А. Д. Неразрушающий метод определения режима возникновения лавинно-теплого пробоя $p-n$ -перехода // Электронная техника. Сер.2. Электроника СВЧ.— 1984.— Вып. 11 (371).— С. 49—55.
6. Шухостанов А. К. Лавинно-пролетные диоды. Физика. Технология. Применение.— М.: Радио и связь, 1997.
7. Давыдова Н. С., Данюшевский Ю. З. Диодные генераторы и усилители СВЧ.— М.: Радио и связь, 1986.
8. Конакова Р. В., Кордош П., Тхорик Ю. А. и др. Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов.— Киев: Наукова думка, 1986.

К. т. н. В. П. ЗАЙКОВ, к. т. н. Л. А. КИНШОВА,
Л. Д. КАЗАНЖИ, Л. Ф. ХРАМОВА

Украина, г. Одесса, НИИ «Шторм»

Дата поступления в редакцию
29.04 2009 г.

Оппонент К. х. н. Л. Т. СТРУТИНСКАЯ
(Ин-т термоэлектричества, г. Черновцы)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ДВУХКАСКАДНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В РЕЖИМЕ $Q_{0\max}$

Получены соотношения для оценки показателей надежности двухкаскадных ТЭУ различной конструкции в зависимости от их основных значимых параметров в режиме $Q_{0\max}$.

В последнее время в термоэлектрическом приборостроении все более широкое применение находят унифицированные ряды модулей и собранные на их основе каскадные термоэлектрические охлаждающие устройства (ТЭУ) различных конструкций.

Интерес к применению каскадных ТЭУ вызван не только необходимостью достижения максимально возможного уровня охлаждения, но и повышением экономичности охлаждения при заданном перепаде температуры.

В ряде случаев при проектировании в распоряжении разработчика имеется ряд конструкций каскадных ТЭУ либо ряд унифицированных (стандартных) модулей, отличающихся друг от друга количеством термоэлементов заданной геометрии.

При компоновке каскадного ТЭУ необходимо оценить величину максимальной холодопроизводительности при заданном перепаде температуры ΔT на устройстве. Для этой цели необходимо при заданной величине ΔT и выбранной конструкции ТЭУ, т. е. при заданном количестве термоэлементов в каскадах (в первом, «холодном» — n_1 , во втором, «горячем» — n_2), определить основные значимые параметры, а именно значения относительного рабочего тока и относительного перепада температуры в каскадах, и затем оценить показатели надежности ТЭУ, чему и посвящена настоящая статья.

Рассмотрим двухкаскадные ТЭУ с последовательным электрическим соединением каскадов, которые, как правило, собираются на базе унифицированных и одинаковых ветвей термоэлементов или стандартных модулей с такими ветвями. Поэтому при определении показателей надежности каскадного ТЭУ (интенсивности отказов λ и вероятности безотказной работы P) полагаем, что все ветви термоэлементов ТЭУ, в том числе и каскады, соединены электрически последовательно, причем выход из строя любого термоэлемента (ветви) приводит к выходу из строя модуля, каскада и устройства в целом.

События, заключающиеся в выходе термоэлементов из строя, принимаются независимыми [1]. Кроме

того, каждый каскад работает в различных температурных условиях, что необходимо учитывать при оценке показателей надежности каскадного ТЭУ заданной конструкции в режиме $Q_{0\max}$.

Для решения поставленной задачи воспользуемся известными соотношениями, в которые с соответствующими каскадами индексами входят следующие величины:

$I_{\max}$ — максимальный рабочий ток;
 e — коэффициент термоэдс ветви термоэлемента;
 R — электрическое сопротивление ветви термоэлемента;
 B — относительный рабочий ток, $B = I/I_{\max}$;
 Q — относительный перепад температуры;
 $\Delta T_{\max}$ — максимальный перепад температуры.

Характерными температурами двухкаскадного ТЭУ являются:

T_0 — температура теплопоглощающего спая первого каскада;
 T_1 — промежуточная температура (температура между каскадами);
 T — температура тепловыделяющего спая второго каскада.

Холодопроизводительность двухкаскадного ТЭУ определяется первым каскадом и вычисляется по формуле

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1), \quad (1)$$

$$\text{где } I_{\max 1} = \frac{e_1 T_0}{R_1};$$

$$\Theta_1 = \frac{T_1 - T_0}{\Delta T_{\max 1}}.$$

Последовательное электрическое соединение каскадов определяет равенство рабочих токов в каскадах, т. е.

$$I_{\max 1} B_1 = I_{\max 2} B_2. \quad (2)$$

Общий перепад температуры на двухкаскадном ТЭУ складывается из перепадов температуры в каскадах $\Delta T_1 = T_1 - T_0$ и $\Delta T_2 = T - T_1$:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta T_{\max 1} Q_1 + \Delta T_{\max 2} Q_2, \quad (3)$$

$$\text{где } \Theta_2 = \frac{T - T_1}{\Delta T_{\max 2}}.$$

Условие теплового сопряжения каскадов можно записать в виде

$$Q_{02} = W_1 + Q_0, \quad (4)$$

где Q_{02} — холодопроизводительность второго каскада,

$$Q_{02} = n_2 I_{\max 2}^2 R_2 (2B_2 - B_2^2 - \Theta_2);$$

W_1 — мощность потребления первого каскада,

$$W_1 = 2n_1 I_{\max 1}^2 R_1 B_1 \left(B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right).$$

Подставив выражения (1)–(3) в (4), получим

$$C_1 = \frac{2B_1 b - B_1^2 c + 2B_1^3 a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} - \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}}}{d - 2B_1 a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0}}, \quad (5)$$

где C_1 — относительная тепловая нагрузка первого каскада,

$$C_1 = \frac{Q_0}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1};$$

$$a = \frac{n_1 I_{\max 1}^2 R_1}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2};$$

$$b = \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}};$$

$$c = \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + 4a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} + \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} + 2a;$$

$$d = \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + a.$$

Из условия $\frac{dC_1}{dB_1} = 0$ получим уравнение для оп-

ределения оптимального относительного рабочего тока первого каскада $B_{1\text{опт}}$, соответствующего максимуму холодопроизводительности двухкаскадного ТЭУ заданной конструкции:

$$AB_1^3 - BB_1^2 + LB_1 - D = 0, \quad (6)$$

где $A = 4a^2 \left(\frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right)^2$;

$$B = a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \left[4 \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + a \left(5 + 4 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) + \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} \right];$$

$$L = \left(\frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + a \right) c;$$

$$D = \left(\frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} \right) \left(\frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + a \right) - a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}}.$$

С погрешностью не более 1% выражение (6) можно упростить и представить в виде квадратного уравнения

$$BB_1^2 - LB_1 + D = 0. \quad (7)$$

Точное значение T_1 можно получить используя метод последовательных приближений, уточняя основные значимые параметры двухкаскадного ТЭУ B_1 , B_2 , Θ_1 , Θ_2 с учетом температурной зависимости па-

раметров. Для получения результата достаточно двух-трех приближений.

С учетом [2, 3] относительную величину интенсивности отказов двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) \left(B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2} k_{T1} + \frac{n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) \left(B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_1 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right)^2} k_{T2}, \quad (8)$$

где λ_0 — номинальная интенсивность отказов;

C_2 — относительная тепловая нагрузка второго каскада,

$$C_2 = \frac{Q_0 + W_1}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2};$$

k_{T1} , k_{T2} — коэффициент значимости, учитывающий влияние пониженной температуры.

Расчеты основных значимых параметров ТЭУ проводились для конфигурации ветвей $l/s=10$ (l , s — длина и площадь поперечного сечения ветви, соответственно) при усредненном значении эффективности термоэлектрического модуля $z_m = 2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К. Результаты расчетов для различных значений отношения числа термоэлементов в каскадах n_1/n_2 при постоянном n_1 сведены в таблицу.

Анализ полученных данных показал, что с уменьшением величины n_1/n_2 основные параметры ТЭУ изменяются следующим образом:

- промежуточная температура T_1 уменьшается (рис. 1);
- величина относительного рабочего тока в каскадах увеличивается;
- относительный перепад температуры в первом каскаде уменьшается, во втором — увеличивается;
- максимальная относительная холодопроизводительность первого каскада $C_{1\text{max}}$ увеличивается;
- интенсивность отказов увеличивается;
- вероятность безотказной работы уменьшается.

С ростом перепада температуры на ТЭУ в диапазоне $\Delta T=60$ —80 К при $n_1/n_2=\text{const}$ происходит следующее:

- промежуточная температура T_1 и относительный перепад температуры во втором каскаде Θ_2 практически не изменяются;
- относительный перепад температуры в первом каскаде Θ_1 увеличивается;
- величина $C_{1\text{max}}$ уменьшается;
- интенсивность отказов незначительно увеличивается;
- вероятность безотказной работы ТЭУ уменьшается.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

Основные параметры двухкаскадного ТЭУ при $T=300$ К, $Q_0=0,1$ Вт, $n_1=9$

B_1	B_2	I , А	Θ_1	Θ_2	n_2/n_1	T_1 , К	$\frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_0 n_1}$	λ_Σ , 10^{-8} 1/ч	P	C_1	$Q_{0\max}$, Вт
$\Delta T=60$ К											
0,48	0,42	2,1	0,65	0,19	1,00	282	0,08	2,04	0,9998	0,07	0,12
0,59	0,55	2,7	0,46	0,35	0,67	270	0,18	4,87	0,9995	0,23	0,41
0,66	0,63	3,0	0,38	0,44	0,50	264	0,41	11,13	0,9989	0,33	0,59
0,72	0,76	3,4	0,25	0,59	0,33	255	1,16	31,33	0,9969	0,50	0,88
0,82	0,84	3,8	0,14	0,72	0,20	249	2,76	74,49	0,9926	0,68	1,19
0,91	0,92	4,3	0,04	0,84	0,10	242	7,67	207,11	0,9795	0,87	1,52
$\Delta T=70$ К											
0,58	0,54	2,7	0,70	0,33	0,67	271	0,23	6,21	0,9994	0,09	0,15
0,69	0,61	3,1	0,62	0,43	0,50	265	0,46	12,33	0,9988	0,20	0,32
0,73	0,73	3,3	0,46	0,57	0,33	256	1,07	29,00	0,9971	0,35	0,56
0,88	0,79	3,6	0,34	0,69	0,20	249	2,33	63,00	0,9937	0,55	0,82
0,92	0,90	4,2	0,22	0,84	0,10	242	7,20	194,00	0,9808	0,71	1,14
$\Delta T=80$ К											
0,70	0,61	3,0	0,84	0,42	0,50	264	0,54	14,60	0,9985	0,07	0,10
0,79	0,72	3,5	0,70	0,57	0,33	256	1,19	32,18	0,9968	0,21	0,31
0,86	0,81	3,8	0,57	0,71	0,20	249	2,70	72,80	0,9927	0,35	0,52
0,92	0,90	4,1	0,45	0,84	0,10	242,5	7,40	199,60	0,9802	0,50	0,72
$\Delta T=0$ К											
0,41	0,46	2,2	-0,32	0,40	1,00	266	0,13	3,42	0,9997	0,40	1,16
0,59	0,69	3,3	-0,40	0,54	0,50	258	0,99	26,80	0,9973	0,75	2,20
0,68	0,80	3,8	-0,45	0,63	0,33	252	2,33	62,80	0,9937	0,97	2,90
0,76	0,92	4,2	-0,50	0,73	0,20	247	5,65	152,50	0,9849	1,18	3,38
0,82	1,02	4,5	-0,55	0,85	0,10	243	14,20	382,00	0,9625	1,37	3,85

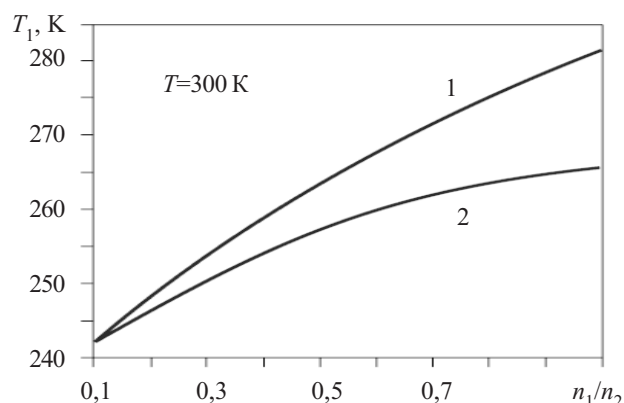


Рис. 1. Зависимость промежуточной температуры от величины отношения n_1/n_2 при $\Delta T=60$ —80 К в режиме $Q_{0\max}$ (1) и в режиме теплового насоса (2)

Так как выражение для относительной величины максимальной холодопроизводительности носит обобщенный характер, оно позволяет определить величину максимальной холодопроизводительности при любом значении n_1 и l/s . Так, при $n_1=9$, $l/s=10$ и $n_1/n_2=0,5$:

$$\begin{aligned} \Delta T=60 \text{ К, } Q_{0\max} &=0,6 \text{ Вт;} \\ \Delta T=70 \text{ К, } Q_{0\max} &=0,33 \text{ Вт;} \\ \Delta T=80 \text{ К, } Q_{0\max} &=0,1 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

С точки зрения распределения температурного поля наибольший интерес представляет режим теплового насоса, т. е. при $\Delta T=0$ К. В этом режиме при уменьшении величины n_1/n_2 происходит следующее:

- промежуточная температура T_1 уменьшается (см. рис. 1);
- величина относительного рабочего тока в каскадах увеличивается (рис. 2);

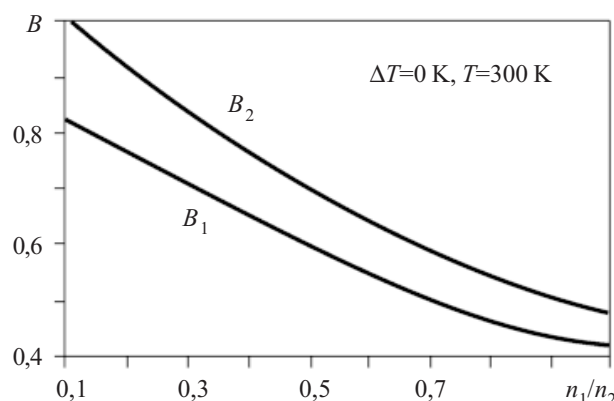


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока в каскадах от величины отношения n_1/n_2 в режиме теплового насоса

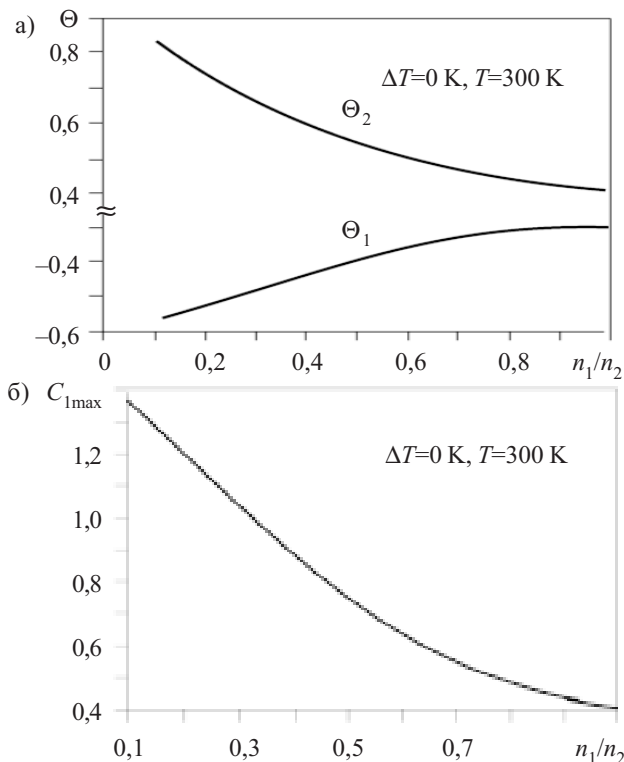


Рис. 3. Зависимость относительных значений перепада температуры в каскадах (а) и максимальной холодопроизводительности (б) двухкаскадного ТЭУ от величины отношения n_1/n_2 в режиме теплового насоса

— относительный перепад температуры в первом каскаде, хотя и имеет отрицательное значение (из-за обратного перепада температуры), уменьшается по абсолютной величине, а во втором каскаде увеличивается (рис. 3, а);

— величина $C_{1\max}$ увеличивается и при $n_1/n_2 = 0,1$ достигает значения 1,37 (рис. 3, б), что превышает максимальную холодопроизводительность однокаскадного ТЭУ на 37% (для однокаскадного ТЭУ при $T = 300$ K, $\Delta T = 0$, $l/s = 10$: $B = 1$, $\theta = 0$, $n = 9$, $E = 0,5$, $C_{\max} = 1$, $Q_{0\max} = 3$ Вт);

— по сравнению с режимами, когда $\Delta T > 0$, интен-

сивность отказов растёт (соотношение $\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0 n_1}$ носит обобщенный характер, т. к. позволяет определить интенсивность отказов ТЭУ с любым количеством термоэлементов в первом каскаде (рис. 4, а) — так, при $n_1 = 9$, $n_1/n_2 = 0,5$ $\lambda_{\Sigma} = 27 \cdot 10^{-8}$ 1/ч);

— вероятность безотказной работы уменьшается, причем при $n_1/n_2 < 0,33$ наблюдается ее резкое уменьшение (рис. 4, б).

Таким образом, предложена и рассмотрена модель взаимосвязи показателей надежности двухкаскадного ТЭУ заданной конструкции с его основными значимыми параметрами при последовательном электрическом соединении каскадов в режиме $Q_{0\max}$. Полученные соотношения позволяют оценить интенсивность отказов и вероятность безотказной работы,

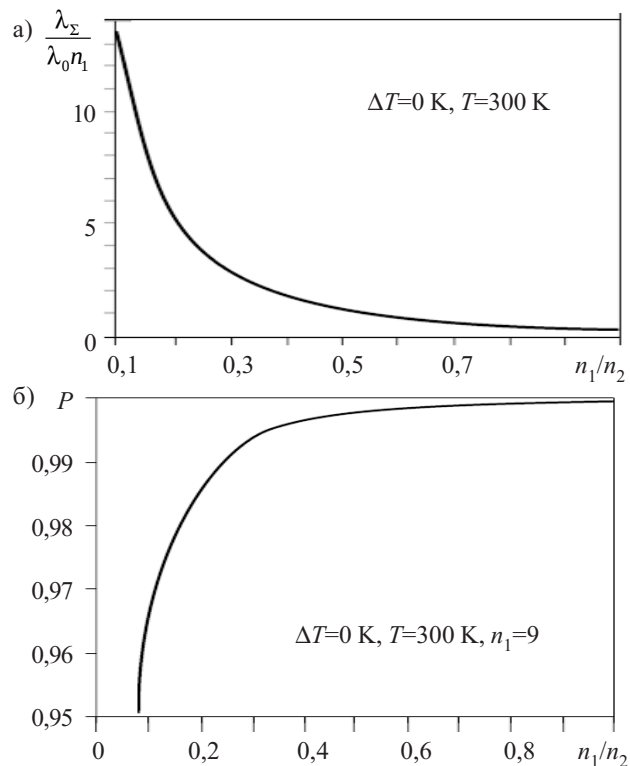


Рис. 4. Зависимость относительной величины интенсивности отказов (а) и вероятности безотказной работы (б) двухкаскадного ТЭУ от величины отношения n_1/n_2 в режиме теплового насоса

определить максимальную холодопроизводительность ТЭУ в зависимости от отношения количества термоэлементов в смежных каскадах с учетом температурной зависимости основных параметров.

Полученные соотношения позволяют также проанализировать работу двухкаскадного ТЭУ в режиме теплового насоса (при $\Delta T = 0$ K). Установлено, что в таком режиме при использовании двухкаскадного ТЭУ можно получить значительно большую, чем в однокаскадном варианте, холодопроизводительность при $n_1/n_2 < 0,33$. Величина интенсивности отказов двухкаскадного ТЭУ, работающего в режиме теплового насоса, практически в два раза больше, чем при работе в режиме охлаждения при $\Delta T = 60$ K.

Приведенные данные позволяют прогнозировать показатели надежности двухкаскадных ТЭУ заданной конструкции в различных условиях эксплуатации и вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием ТЭУ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Леонтьев Л. П. Введение в теорию надежности радиоэлектронной аппаратуры.— Рига: АН ЛССР, 1963.
2. Моисеев В. Ф., Зайков В. П. Влияние режима работы охлаждающего термоэлемента на показатели надежности термоэлектрического устройства // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 4–5.— С. 30–32.
3. Зайков В. П., Киншова Л. А., Марченко В. И. Влияние тепловой нагрузки на показатели надежности термоэлектрического устройства // Тепловые режимы и охлаждение РЭА.— 2003.— Вып. 1.— С. 56–62.

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, к. ф.-м. н. Д. М. ЁДГОРОВА,
к. ф.-м. н. Э. Н. ЯКУБОВ

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

Дата поступления в редакцию
12.05 2009 г.

Оппонент к. ф.-м. н. З. Ф. ЦИБРИЙ
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

КОРРЕЛЯЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ВЫРАЩИВАНИЯ

Экспериментально установлено, что изменяя условия выращивания, можно получить эпитаксиальные слои с требуемыми параметрами (толщиной, подвижностью и концентрацией носителей заряда).

При разработке полупроводниковых структур на основе тонких (около 1 мкм) эпитаксиальных слоев и пористых структур стоит задача определения (прямо или косвенно) их основных параметров. Однако для пористых материалов интерпретация результатов измерения подвижности носителей заряда традиционными методами (например при помощи эффекта Холла) затруднена в силу их низких значений. В этом случае предлагается оценивать подвижность носителей по времени их пролета через образец [1].

С практической точки зрения особенно важной становится задача оценки электрофизических параметров арсенида галлия, определяющих свойства полупроводниковых приборов на его основе [2]. В частности, для получения структур с высокой фоточувствительностью необходимо формировать их активные области с максимально возможной подвижностью носителей заряда, а для термочувствительных структур следует подавить зависимость подвижности от температуры.

Таким образом, знание путей управления характеристиками носителей заряда с учетом зависимости их подвижности от концентрации играет важную роль в развитии технологии получения полупроводниковых структур. В этом аспекте, изменение температурного режима получения активной области также может служить инструментом управления зависимостью подвижности носителей от их концентрации.

Изучение этих сложных зависимостей требует привлечения соответствующих методов определения подвижности носителей в активной области, например метод определения подвижности носителей по температурной зависимости выходных вольт-амперных характеристик модельных структур типа полевого транзистора [3]. На объемных образцах подвижность носителей заряда и тип проводимости определяется широко используемым методом, основанным на эффекте Холла [4]. Однако эти методы не позволяют

точно определить подвижность носителей заряда в тонких эпитаксиальных слоях, поскольку требуют изготовления образцов определенных размеров. Так, в наиболее широко используемых методах, основанных на эффекте Холла и магниторезистивном эффекте, соотношение геометрических размеров образца и местоположение контактов могут существенно влиять на результаты измерений. Согласно теории, металлические контакты к образцам, предназначенным для измерения ЭДС Холла, должны иметь малую площадь, чтобы не исказить линии тока в образце. Поэтому в ряде случаев к измеряемым образцам создают боковые отростки гантелеобразной формы. При этом образец должен быть достаточно длинным.

Для образцов с симметричным расположением двух ЭДС-контактов отношение длины образца к ширине должно быть больше четырех. При исследовании образцов произвольной формы используют четырехзондовый метод [4]. Следует отметить, что при измерениях по методу «ЭДС Холла» в высокоомных образцах параметр, определяющий подвижность носителей заряда ($\Delta\rho_x/\rho$), изменяется под воздействием магнитного поля лишь на 2%, а в случае коротких образцов, когда проявляется эффект геометрического магнитосопротивления, изменения $\Delta\rho/\rho$ составляют около 50% [4]. Кроме того, методы Холла для измерения параметров образцов с тонкой активной областью или малыми размерами не могут быть использованы напрямую. Например, в экспрессном методе необходимо поддерживать задаваемое фиксированное значение тока [5]. Применительно к тонким пленкам необходимо сохранять низкие значения тока (от 10 до 100 мкА), которые не могут быть обеспечены с помощью стандартных блоков питания. Вопрос требует особого решения.

Целью настоящей работы является определение экспресс-методом подвижности носителей заряда в эпитаксиальных слоях, служащих активной областью полупроводниковой структуры, и установление корреляции между технологическими условиями ее получения и основными параметрами активной области (например, эпитаксиального слоя арсенида галлия n -типа проводимости, служащего каналом полевого транзистора с управляющим p - n -переходом, а также активной областью структур с барьером Шоттки).

Усовершенствование экспресс-методики определения подвижности носителей заряда

По сравнению с известными, используемая в [5] методика определения подвижности носителей в диодах Ганна является экспрессной. В этом методе, наряду с поддержкой фиксированного значения рабочего тока, необходимо выполнять условие линейности зависимости тока от напряжения, т. е. необходимо проводить измерения при малых напряжениях (порядка 0,025—0,08 В).

Для реализации экспресс-метода измерения подвижности носителей заряда в тонких пленках в измерительную установку Холла был введен специальный узел (СУ) на полевом транзисторе, обеспечивающий прецизионное регулирование фиксированного тока через исследуемый образец (рис. 1). Магнитный узел (МУ) выполнен на электромагните, напряженность магнитного поля которого регулируется изменением рабочего тока. Его питание осуществляется от стабилизатора с выпрямителем, который через переключатель Π_2 соединяется с катушкой электромагнита L . Ток катушки изменяется с помощью регулятора R_2 и фиксируется амперметром A . Значение напряженности магнитного поля определяется измерителем. Блок измерения состоит из источника тока E , переключателя полярности Π_1 и СУ на полевом транзисторе (ПТ), ток которого регулируется резистором R_1 . От держателя образца ДО идут выводы для подключения образцов Холла, предназначенных для измерения как проводимости, так и подвижности носителей заряда. Выбор режимов осуществляется переключателем Π_3 . В режиме тока Холла к токоподводящим контактам подключается вольтметр.

Следует отметить, что традиционно подвижность носителей заряда по току Холла определяется на основании измерений сопротивления образца в отсутствие магнитного поля $R(0)=V(0)/I(0)$ и в магнитном

поле $R(B)=V(B)/I(B)$, где $I(0)$ и $I(B)$ — соответствующие токи Холла. Затем эти значения подставляют в формулу для определения подвижности носителей заряда:

$$\mu_T = \frac{1}{B} \left[\frac{\Delta R(B)}{R(0)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где $\Delta R=R(0)-R(B)$.

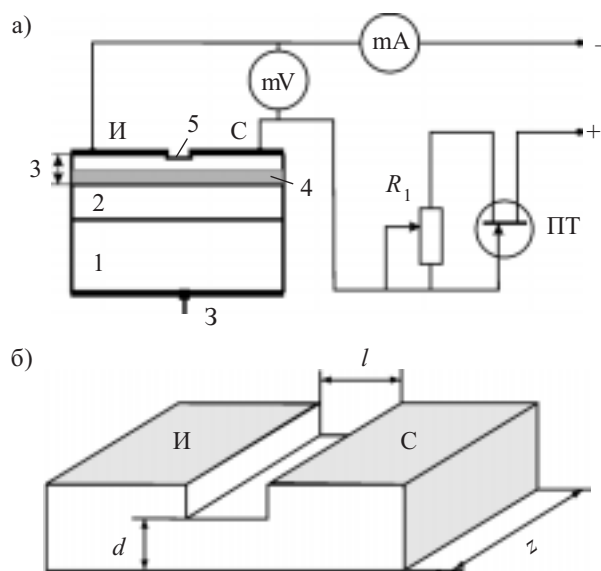


Рис. 2. Структура типа полевого транзистора с эпитаксиальным $p-n$ -переходом:

a — подключение в режиме плавающего затвора к схеме экспресс-установки Холла; b — сечение активной области; l — подложка p^+GaAs ; 2 — промежуточный слой $pGaAs$; 3 — эпитаксиальный слой $nGaAs$; 4 — слой объемного заряда; 5 — расстояние между стоком C и истоком $И$ (длина канала l); 3 — затвор; z — ширина канала

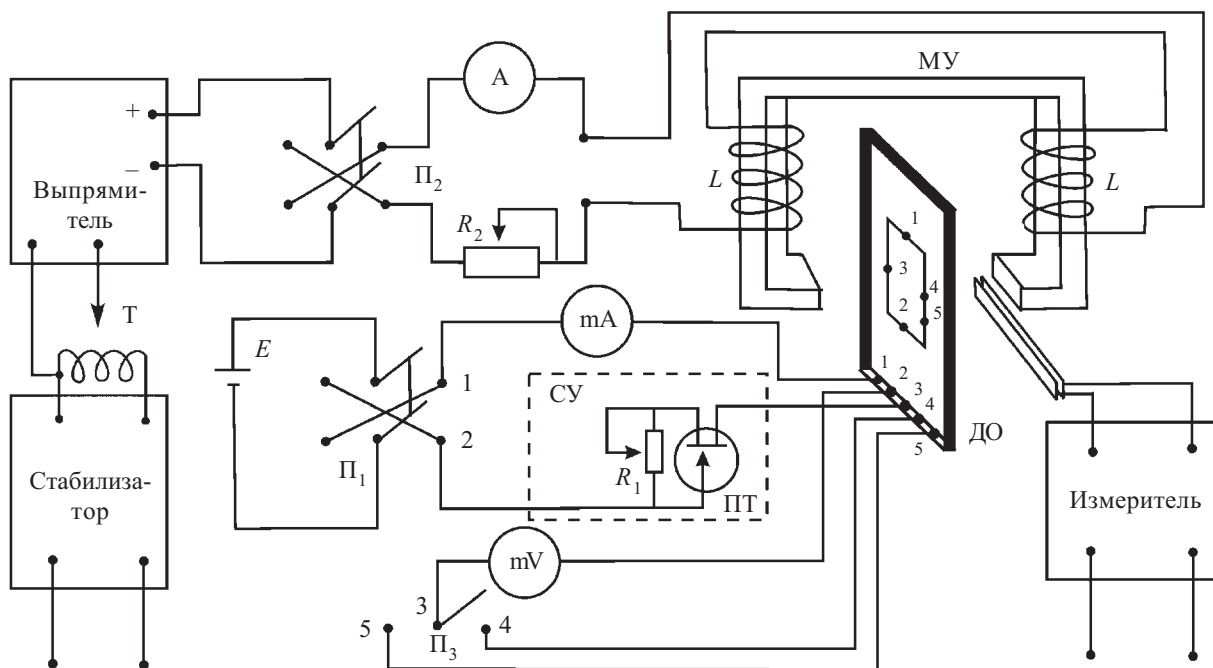


Рис. 1. Блок-схема универсальной усовершенствованной измерительной установки Холла

В нашем же случае при заданном фиксированном токе $I = \text{const}$, задаваемом СУ, измеряли падение напряжения в отсутствие магнитного поля $V(0)$ и в магнитном поле $V(B)$, и определяли подвижность носителей заряда по формуле [5]

$$\mu_T = \frac{1}{B} \left[\frac{\Delta V(B)}{V(0)} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $\Delta V = V(B) - V(0)$, причем $\mu_T B \ll 1$.

Затем на основании данных о подвижности носителей заряда и геометрических размеров образца оценивали концентрацию носителей заряда по формуле

$$N = l / (q \mu_T S R), \quad (3)$$

где l — расстояние между контактами;

μ_T — подвижность носителей заряда;

S — сечение активной области, $S = dZ$ (рис. 2, б).

Возможности настоящей методики можно расширить вплоть до определения подвижности по толщине активной области.

Исследование корреляции основных параметров активной области и технологических условий роста пленок

Предложенную методику можно применить для установления корреляции технологического процесса и параметров выращиваемых активных слоев. Для этой цели были изготовлены модели структуры типа полевого транзистора. Подключение модели к схеме измерительной установки показано на рис. 2. Исследуемые структуры получены по технологии создания резких p - n -переходов [6] методом жидкостной эпитаксии на подложках p^+ -GaAs с выращенным промежуточным слоем p -GaAs и эпитаксиальным слоем n -GaAs, создающим p - n -переход со слоем объемного заряда.

В расворе-расплаве (Ga+GaAs), из которого выращивался эпитаксиальный слой n -GaAs, в одном случае растворяли монокристаллический n -GaAs, легированный Te с концентрацией $N = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в другом случае — GaAs, содержащий по 0,1% Te и Si, и в последнем случае — n -GaAs, легированный Sn. В результате были получены образцы с p - n -переходами, где n -области отличаются друг от друга легирующими примесями. Подложки из монокристаллического p^+ -GaAs, ориентированные в кристаллографическом направлении $\{100\}$, площадью $10 \times 10 \text{ мм}$, имели толщину 350—400 мкм. Толщина выращенных эпитаксиальных слоев n -GaAs составляла 0,5—1,5 мкм. На их поверхности для формирования омических контактов, выполняющих роль стока (С) и истока (И), через маску напыляли сначала Sn, а затем — Ni. Расстояние между контактами, т. е. длина канала l , составляло 50 мкм, ширина канала — 0,7—1,0 мм при площади контакта стока (истока) 0,5—1 мм². Толщина слоя активной области d доводилась до 0,5 мкм травлением в специальном растворе 5% NaOH + 30% H₂O₂ (при соотношении частей 5:1). С тыльной стороны подложки напылением никеля формировали контакт затвора (З). В исследуемых образцах отношение длины канала к ширине удовлетворяет условию $(l/Z) \ll 1$, что обеспечивает высокую точность измерений [5].

На основании исследования экспресс-методом концентрации и подвижности носителей заряда в моделях структур были получены исходные данные для определения корреляции параметров выращиваемых слоев с технологическими процессами. Известно, что при выборе технологии получения эпитаксиальных слоев основными критериями являются начальная и конечная температура роста пленок, т. к. подвижность носителей в выращенных пленках зависит от концентрации примесей, а концентрация, в свою очередь, зависит от температуры. Управляя начальной температурой процесса роста, можно получить режимы выращивания эпитаксиальных слоев с высокой подвижностью носителей заряда, необходимой для улучшения фотоусилительных свойств структур с p - n -переходом (например фотодиодов и фототранзисторов).

Было изучено влияние изменения начальной температуры технологического процесса на параметры выращенных слоев с различными легирующими примесями. Экспериментальные структуры, полученные при разных технологических режимах, подключали к измерительной установке Холла (рис. 1), данные измерений подставляли в формулы (2) и (3). Результаты вычислений приведены в табл. 1. Как видно, в слоях, легированных одновременно Te и Si, подвижность носителей заряда (1000—500 см²/Вс) в два и более раза меньше, чем в слоях, легированных только Te (3200—1200 см²/Вс).

Таблица 1

Результаты расчета подвижности носителей заряда и их концентрации в эпитаксиальных слоях с различными легирующими примесями

Примесь	$T_{\text{нач}}, ^\circ\text{C}$	$I_{\text{си}}, 10^{-4} \text{ А}$	$\mu_T, \text{ см}^2/\text{Вс}$	$N, 10^{16} \text{ см}^{-3}$
Te	850	6	3200	1
Te	850	25	3200	1
Te	852	8	3100	5,5
Te	830	29	1200	6
Te+Si	845	25	500	4,45
Te+Si	845	8	500	4,45
Te+Si	852	2,2	1000	8

Другая тенденция — это уменьшение подвижности носителей заряда в два и более раза с понижением температуры роста слоев с 850 до 845 и 830°С. Уменьшение подвижности носителей заряда при введении совместно с теллуром кремния обусловлено донорно-акцепторными компенсирующими свойствами кремния. Факт уменьшения подвижности при снижении температуры роста можно объяснить увеличением концентрации носителей заряда в теллуре в выращиваемых слоях в связи с изменением его растворимости в арсениде галлия [7, с. 84—85].

В нашем случае, в связи с изменением начальной температуры изменяется ток через структуру, и корреляционные параметры определяются по зависимости

$$\frac{1}{\mu} \sim N \sim I(T_{\text{нач}}).$$

Рассмотрим эксперимент, в котором исследовалось влияние на подвижность и концентрацию носи-

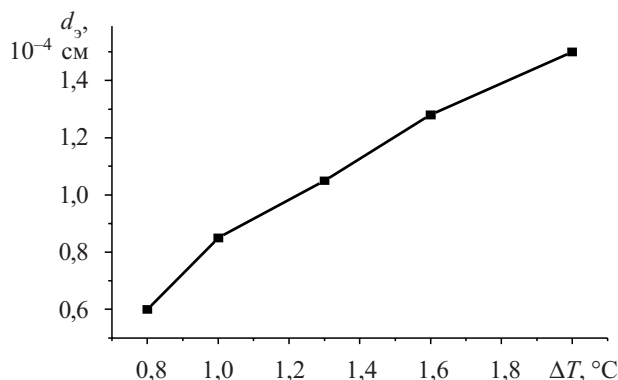


Рис. 3. Зависимость толщины выращиваемого слоя от интервала температуры процесса роста

телей заряда изменения интервала температуры роста слоев, легированных оловом, выращенных из равного количества растворов-расплавов с идентичными параметрами, т. е. с одинаковой концентрацией носителей в источнике и начальной температурой кристаллизации. Исходная толщина слоев определялась по измерениям вольт-емкостных характеристик, а исследование зависимости толщины от изменения температуры роста позволяет установить взаимосвязь технологического режима и параметров выращиваемых слоев. Установленная типичная усредненная зависимость толщины выращиваемого слоя d_3 от интервала температуры процесса роста $\Delta T = T_{\text{нач}} - T_{\text{конц}}$ при начальной температуре $T_{\text{нач}} = 845^\circ\text{C}$ приведена на рис. 3.

Результаты измерений на усовершенствованной установке Холла (рис. 1) и определенные по формулам (2) и (3) μ_r и N для арсенид-галлиевых эпитаксиальных слоев, легированных оловом, полученных при заданных интервалах температуры процесса выращивания, сведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что с уменьшением ΔT толщина слоев, а также подвижность носителей заряда уменьшаются по определенной закономерности. Так, в эпитаксиальных слоях, выращенных из раствора-расплава с источником из $n\text{GaAs}$, легированного оловом с концентрацией не выше $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, концентрация носителей заряда лежит в интервале $(1,23 - 1,92) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а подвижность носителей заряда изменяется в пределах $5530 - 3550 \text{ см}^2/\text{Вс}$. При малом интервале температуры роста концентрация носителей в эпитаксиальных слоях $(1,92 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3})$ сравни-

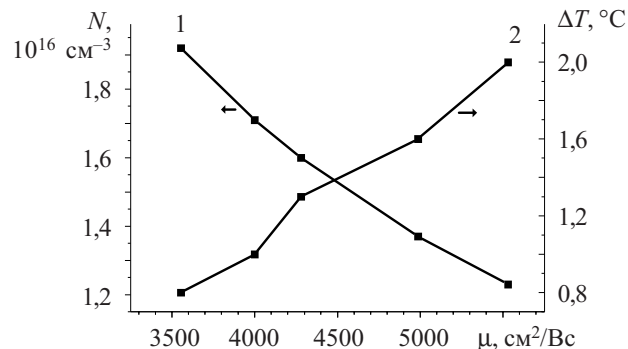


Рис. 4. Зависимость подвижности электронов от концентрации носителей заряда, характер которой задается интервалом температуры процесса жидкостной эпитаксии

ма с концентрацией в источнике ($2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). По мере увеличения ΔT вместе с уменьшением концентрации носителей ($1,23 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) увеличиваются значения подвижности носителей заряда ($5530 \text{ см}^2/\text{Вс}$).

В эпитаксиальных слоях, легированных теллуром, в отличие от слоев, легированных оловом, зависимость концентрации носителей от интервала температуры имеет возрастающий характер.

Анализ полученных данных показывает возможность управления параметрами выращиваемых эпитаксиальных слоев. Из рис. 4 видно, что основываясь на соответствующей зависимости подвижности от концентрации, характер которой определяется интервалом температуры роста слоев, можно получать слои с различными параметрами — с высокой подвижностью носителей заряда (для фоточувствительных структур) и с умеренной подвижностью (для теплочувствительных структур).

Заключение

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что изменяя начальную температуру процесса выращивания, можно достигнуть участка на кривой зависимости $N=f(\mu)$, где начальные параметры эпитаксиального слоя определяются состоянием раствора-расплава. Подбирая интервал температуры процесса выращивания, можно получить слои с требуемой подвижностью и концентрацией носителей заряда.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Казакова Л. П., Мынбаева М. Г., Мынбаев К. Д. Дрейфовая подвижность носителей заряда в пористом карбиде кремния // Физика и техника полупроводников. — 2004. — Т. 38, вып. 9. — С. 1118—1120.
2. Ботнарчук М. В., Жилиев Ю. В., Орлова Т. А. и др. Корреляция электрофизических и люминесцентных свойств GaAs высокой чистоты // Письма в ЖТФ. — 2004. — Т. 30, вып. 19. — С. 25—29.
3. Малин Б. В., Сонин М. С. Параметры и свойства полевых транзисторов. — М.: Энергия, 1967.
4. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. — М.: Высш. школа, 1987.
5. Larrable R. D., Walter A. H., Martin C. S. A rapid evaluation technique for functional Gunn diodes // IEEE Transactions on Electron Devices. — 1970. — Vol. e-17, N. 4. — P. 271—274.
6. А. с. 762253 СССР. Способ получения $p-n$ -переходов на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 / А. В. Каримов, М. Мирзабаев. — 16.05.1980.
7. Андреев В. М., Долгинов Л. М., Третьяков Д. Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. — М.: Сов. радио, 1975.

Таблица 2

Экспериментально-расчетные данные для эпитаксиальных слоев, легированных Sn

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2	1,6	1,3	1	0,8
$d_3, 10^{-4} \text{ см}$	1,5	1,28	1,05	0,85	0,6
$V, \text{ В}$	0,054	0,074	0,055	0,03	0,019
$I_{\text{си}}, 10^{-7} \text{ А}$	1,23	1,45	0,88	0,39	0,17
$V(\bar{B}), \text{ В}$	0,058	0,079	0,057	0,031	0,019
$\Delta V, \text{ В}$	0,004	0,0046	0,0025	0,0012	0,0006
$\mu_r, \text{ см}^2/\text{Вс}$	5530	4986	4279	4000	3550
$N, 10^{16} \text{ см}^{-3}$	1,23	1,37	1,6	1,71	1,92

Д. т. н. В. Г. СПИРИН

Россия, Арзамасский политехнический институт
E-mail: spvl49@mail.ru

Дата поступления в редакцию
14.04 2009 г.

Оппонент д. т. н. Ю. В. ПАНФИЛОВ
(МГУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА

Исследована погрешность сопротивления тонкопленочного резистора, вызванная исключением контактных площадок перекрытия резистивного и проводящего слоев.

Как известно, при формировании тонкопленочных резисторов (ТПР) в их конструкции предусматривают четыре контактные площадки перекрытия (КПП) резистивного и проводящих элементов [1], которые исключают влияние несовмещения фотошаблонов (ФС) на погрешность сопротивления резистора. Как видно из **рис. 1**, наличие КПП увеличивает промежуток между тонкопленочными элементами, что приводит к снижению плотности монтажа. Оценим насколько увеличивается при этом зазор между элементами.

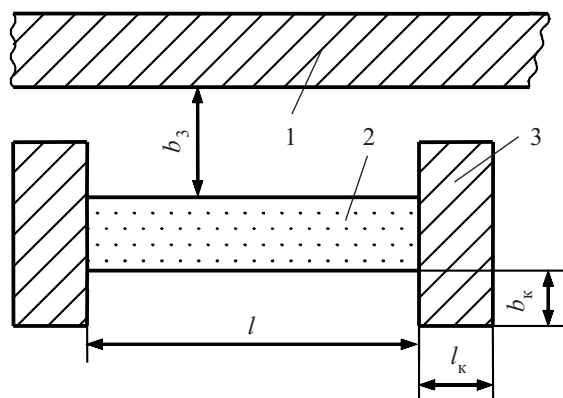


Рис. 1. Влияние КПП на плотность монтажа:
1 — проводник; 2 — резистивный элемент; 3 — КПП

Определим минимальные размеры КПП и зазор между проводником и резистивным элементом, которые обеспечиваются комплектом ФШ. Эти размеры будут зависеть от следующих производственных погрешностей: несовмещения комплекта ФШ ($\Delta B_{\text{фш}}$), несовмещения проводящего слоя платы и второго ФШ, формирующего резистивный слой ($\Delta B_{\text{фл}}$), изменения размеров ТПР, обусловленных первой фотолитографией и травлением [2, 3], т. е. погрешностями длины ТПР.

Длину КПП можно рассчитать по формуле [2, 3]

$$l_{\kappa} = K_l (\Delta B_{\text{фп}} + \Delta l_{\text{с}} + \Delta l),$$

где $\Delta l_c, \Delta l$ — абсолютные систематическая и случайная погрешности длины l ТПР:

K_l — коэффициент запаса формирования длины КПП. (Так как длина КПП незначительно влияет на плотность межсоединений, $K_l=2\dots 5$.)

Процессы фотолитографии и травления проводящей пленки являются изотропными, поэтому размеры КПП на плате после выполнения этих процессов отклоняются от базовых линий на ФШ на одну и ту же величину $(\Delta l \pm \Delta l)/2$ [2].

Резистивный элемент не должен выходить за пределы контактных площадок, поэтому минимальная ширина КПП должна быть такой, чтобы величина b_k (см. рис. 1) была не меньше

$$b_{\kappa \min} = \Delta B_{\phi \text{III}} + \Delta B_{\phi \text{II}} + (\Delta I_{\text{c}} + \Delta I)/2. \quad (1)$$

Минимальный зазор между проводниками $b_{3 \min}$ обычно равен минимальной ширине проводника $b_{\Pi \min}$, но при наличии контактных площадок он будет дополнительно увеличен на величину b_{κ} , т. е.

$$b_{z \min} = b_{\pi \min} + b_{\kappa \min}. \quad (2)$$

Погрешности, входящие в формулу (1), в случае применения фототаблицей класса С составляют [3—5]: $\Delta l_c = 6,2$ мкм; $\Delta l = 10,8$ мкм; $\Delta B_{\text{фш}} = 3,5$ мкм; $\Delta B_{\text{фл}} = 1,5$ мкм, откуда $b_{k, \text{min}} = 13,5$ мкм. Тогда при $b_{n, \text{min}} = 10$ мкм получим $b_{k, \text{min}} = 23,5$ мкм.

Из рассмотренного примера видно, что наличие КПП увеличивает минимальный зазор между проводником и резистором в 2,35 раза. Расчеты показывают, что даже в случае применения прецизионных фотомасок и фотолитографии плотность монтажа существенно уменьшается из-за КПП. Поэтому для проектирования тонкопленочной платы представляет интерес рассмотрение погрешности сопротивления резистора без КПП. Конструкция такого резистора, полученного при смещении ФШ резистивного слоя относительно проводящего слоя платы, показана на **рис. 2, а**.

Резистор $R_{\text{см}}$ представим в виде двух параллельно соединенных резисторов $R1$ и $R2$ (см. рис. 2, б, в), и тогда можно записать

$$R_{\text{cm}} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}. \quad (3)$$

Величина сопротивлений $R1$ и $R2$ определяется как $R1=\rho(l/\Delta B+2m)$; (4)

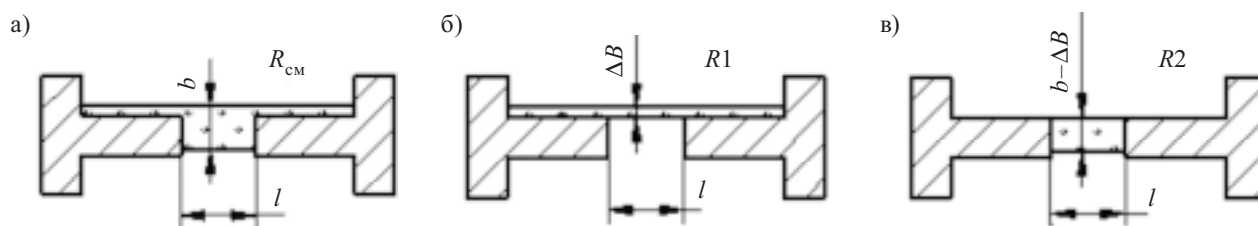


Рис. 2. Конструкция резистора без КПП (а) и формирование погрешности его сопротивления (б, в)

$$R2 = \rho l / (b - \Delta B), \quad (5)$$

где ΔB — величина смещения резистивного слоя относительно проводящего слоя, $\Delta B = \Delta B_{\text{фш}} + \Delta B_{\text{фл}}$;

m — число квадратов углового участка резистивного элемента резистора $R1$ (на данном участке происходит искривление протекания тока).

Определим сопротивление $R_{\text{см}}$. Подставим формулы (4) и (5) в (3) и, упростив полученное выражение, запишем

$$R_{\text{см}} = \rho \frac{l(l + 2m\Delta B)}{lb + 2m\Delta B(b - \Delta B)}. \quad (6)$$

В этом выражении множителем ρ является коэффициент формы $K_{\text{фсм}}$ резистора $R_{\text{см}}$, т. е.

$$R_{\text{см}} = \rho K_{\text{фсм}}.$$

Обозначив $\delta B = \Delta B / b$ и проведя некоторые преобразования, получим

$$K_{\text{фсм}} = \frac{K_{\text{ф}}}{1 - 2m \cdot \delta B^2 / (K_{\text{ф}} + 2m\delta B)}, \quad (7)$$

где $K_{\text{ф}} = l/b$ — коэффициент формы резистора $R_{\text{см}}$ при $\delta B = 0$, т. е. в отсутствие смещения.

Используя выражение (4), найдем абсолютную ($\Delta K_{\text{ф}}$) и относительную ($\delta K_{\text{ф}}$) погрешности коэффициента формы резистора $R_{\text{см}}$:

$$\Delta K_{\text{ф}} = K_{\text{фсм}} - K_{\text{ф}} = \frac{K_{\text{ф}}}{1 - \frac{2m \cdot \delta B^2}{K_{\text{ф}} + 2m\delta B}} - K_{\text{ф}}; \quad (8)$$

$$\delta K_{\text{ф}} = \frac{\Delta K_{\text{ф}}}{K_{\text{ф}}} = \frac{1}{1 - \frac{2m \cdot \delta B^2}{K_{\text{ф}} + 2m\delta B}} - 1. \quad (9)$$

Рассчитаем систематическую погрешность сопротивления $R_{\text{с}}$, которая возникает из-за исключения КПП:

$$R_{\text{с}} = R_{\text{см}} - R = \rho \cdot \Delta K_{\text{ф}},$$

где R — сопротивление резистора $R_{\text{см}}$ при $\delta B = 0$.

Эта погрешность увеличивает сопротивление ТПР. Как видно из выражений (8) и (9) погрешность коэффициента формы будет определяться величиной смещения δB и коэффициентом формы резистора без смещения $K_{\text{ф}}$. Задаваясь этими величинами, можно определить погрешность резистора за счет смещения фотошаблона.

Из рассмотрения конструкции ТПР на рис. 2 можно предположить, что значение m является функцией длины электродов смещенного резистивного элемента

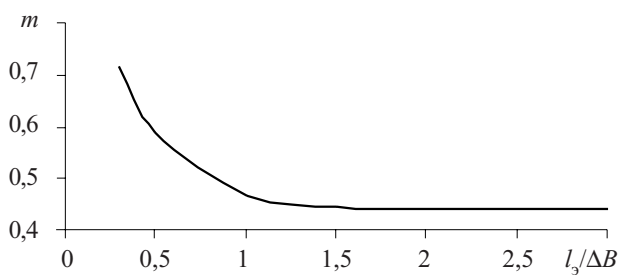
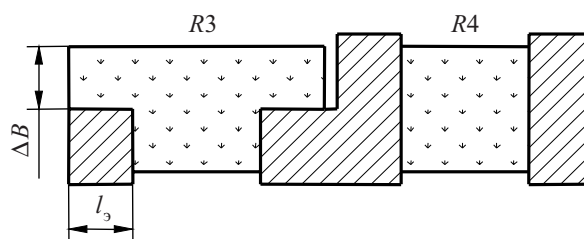


Рис. 3. Зависимость числа квадратов углового участка от приведенной длины электрода

l_3 и величины ΔB . В работе [6] был проведен теоретический анализ зависимости $m = f(l_3 / \Delta B)$, который показал, что при уменьшении отношения $l_3 / \Delta B$ ниже 1 значение m резко возрастает (рис. 3), а в области $(l_3 / \Delta B) \geq 1$ оно остается практически постоянным (для $l_3 = \Delta B$, $m = 0,461$, а для $l_3 = 3\Delta B$, $m = 0,436$).

Для подтверждения этих данных был проведен эксперимент с помощью специально разработанной тестовой схемы (рис. 4). Размеры резисторов $R3$, $R4$ ($l = b = 3$ мм) и смещение ($\Delta B = 1,5$ мм) были выбраны достаточно большими с целью минимизации влияния производственных погрешностей сопротивления ТПР на результат измерения. Для приведенных значений $K_{\text{ф}}$ и ΔB тестовой схемы после несложных преобразований из формулы (9) можно найти

$$m = 2 \cdot \delta K_{\text{ф}} / (1 - \delta K_{\text{ф}}). \quad (10)$$


 Рис. 4. Тестовая схема для определения m

Для нахождения m в центральной части подложки были сформированы четыре тестовые схемы. В состав каждой входил один резистор $R4$ и два резистора $R3$, у одного из которых длина электрода $l_3 = \Delta B$, а у другого $l_3 = 3\Delta B$. Было изготовлено шесть подложек, на которых измерялись сопротивления всех резисторов.

Величину m определяли следующим образом.

Вычисляли значения отношений сопротивлений резисторов на всех тестовых схемах

$$K3_i = R3_i / R4_i$$

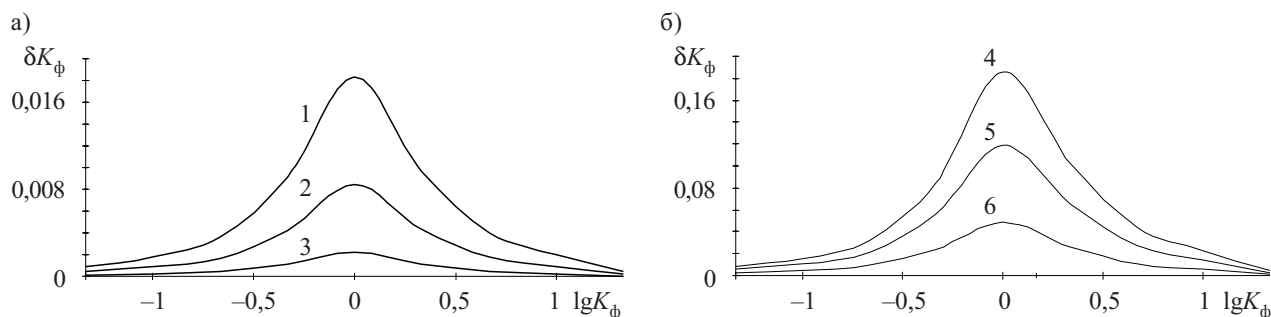


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности коэффициента формы ТПР от значения коэффициента формы при различных значениях относительного несовмещения фотошаблона δB :
1 — 0,15; 2 — 0,1; 3 — 0,05; 4 — 0,5; 5 — 0,4; 6 — 0,25

и среднее значение полученных коэффициентов

$$K_3 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k K_{3i},$$

где i — номер тестовой схемы, k — их количество.

Учитывая, что $\delta K_3 = K_3 - 1$ и используя формулу (10), определим

$$m = 2(K_3 - 1) / (2 - K_3).$$

В результате были получены следующие средние значения: $m_1 = 0,41$ для $l_3 = \Delta B$ и $m_2 = 0,40$ для $l_3 = 3\Delta B$. При этом разброс значений m составлял 0,348—0,448, что можно объяснить погрешностью микродефектов [7, с. 42], которая образуется, например, вследствие шероховатости подложки.

Также для некоторых значений δK_ϕ , которые близки к экспериментальным, значения m были рассчитаны по формуле (10). Результаты расчета приведены в таблице.

δK_ϕ	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
m	0,353	0,381	0,41	0,439	0,469

Их анализ показывает, что разброс $\delta K_\phi = 2\%$, характерный для эксперимента, приводит к разбросу $m = 0,353—0,469$, что хорошо согласуется с полученными экспериментальными результатами. Погрешность расчетного значения m относительно среднего экспериментального не превышает 11%. Тем не менее, учитывая разброс m , для $l_3 \geq \Delta B$ при расчете зависимости $\delta K_\phi = f(K_\phi)$ будем использовать значение $m = 0,461$. Проектирование ТПР с $(l_3 / \Delta B) < 1$ не рекомендуется, т. к. при этом величина погрешности δK_ϕ резко возрастет.

Анализ представленных на рис. 5 зависимостей показал, что систематическая погрешность, увели-

чивающая общее сопротивление ТПР, достигает своего максимального значения при $K_\phi = 1$. В большинстве случаев — при $K_\phi < 1$ и $K_\phi > 10$ — ТПР можно изготавливать без КПП, что существенно повысит плотность монтажа. Однако изготовление без КПП резисторов малых размеров и коэффициентом формы $0,1 < K_\phi < 10$ (кривая 4 на рис. 5, б), даже в случае прецизионного изготовления фотошаблонов и тонкопленочной платы, приводит к недопустимой погрешности сопротивления ТПР.

Полученные результаты исследований особенно значимы при проектировании ТПР с малыми топологическими размерами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бондаренко О. Е., Федотов Л. М. Конструктивно-технологические основы проектирования микросборок. — М.: Радио и связь, 1988.
2. Спирин В. Г. Математические модели сопротивления тонкопленочного резистора с размерами 50 мкм // Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре. — 2004. — № 2. — С. 14—16.
3. Спирин В. Г. Оценка производственных погрешностей тонкопленочных элементов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2004. — № 4. — С. 50—53.
4. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств. — М.: Радио и связь, 1991.
5. ОСТ 4 ГО.073.210-84. Фотошаблоны прецизионные. Общие технические условия.
6. Потехин В. А., Спирин В. Г., Шурыгин Б. Д. Расчет функции числа квадратов углового участка тонкопленочного резистора // Межвуз. сб. статей «Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении». — Н. Новгород—Арзамас, 2003. — С. 366—369.
7. Фомин А. В., Боченков Ю. И., Сорокопуд В. А. Технология, надежность и автоматизация производства БГИС и микросборок. — М.: Радио и связь, 1981.

К. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ, к. ф.-м. н. А. Г. БОРИСЕНКО,
к. т. н. В. Н. ИВАНОВ, к. ф.-м. н. А. О. ФЕДОРОВИЧ,
В. А. КРИВУЦА, Б. П. ПОЛОЗОВ

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»; Институт ядерных исследований
E-mail: ndiorion@tsua.net

Дата поступления в редакцию
18.09 2009 г.

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

ФОРМИРОВАНИЕ МЕЗАСТРУКТУР 4HSiC $p-i-n$ -ДИОДОВ МЕТОДОМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ

Представлены результаты исследования и оптимизации процесса формирования карбидокремниевой мезоструктуры для $p-i-n$ -диода на промышленной технологической базе. Исследованы характеристики диодов в интервале температуры 25—500°C.

Известно, что совокупность фундаментальных свойств карбида кремния и уровень развития технологии выращивания эпитаксиальных p^+-n-n^+ -структур создает реальные предпосылки для создания быстродействующих высоковольтных 4HSiC $p-i-n$ -диодов, предназначенных для коммутации СВЧ-сигналов мощностью до 2 кВт со временем переключения 10—30 нс [1, 2]. Исследования 4HSiC $p-i-n$ -диодов в широком интервале температуры показали, что диоды могут функционировать при высокой температуре — вплоть до 500°C [3].

В предыдущих наших работах было показано, что для реализации потенциальных возможностей $p-i-n$ -диодов на основе 4HSiC необходимо создать промышленную технологию формирования чипа (мезоструктуры) с термостабильными контактами, пригодными для использования в производстве СВЧ интегральных схем и корпусированных приборов [2, 3]. Однако, в отличие от промышленной технологии изготовления кремниевых чипов, процесс изготовления карбидокремниевых чипов быстродействующих диодов значительно сложнее, поскольку связан с техпроцессами прецизионного плазмохимического травления 4HSiC на глубину 4—6 мкм, которые еще недостаточно изучены.

Целью данной работы была разработка и оптимизация техпроцессов формирования мезоструктур высоковольтных быстродействующих 4HSiC $p-i-n$ -диодов на промышленной технологической базе, а также исследование их вольт-амперных характеристик (ВАХ) и характеристик переключения в интервале температуры 25—500°C.

Технологические процессы формирования чипа $p-i-n$ -диода на основе 4HSiC

Разработанный чип диода (рис. 1) представляет собой прямую мезоструктуру p^+-n-n^+ -типа с жесткими золотыми выводами, предназначенными для монтажа в СВЧ-корпус диода или в элементы топологии

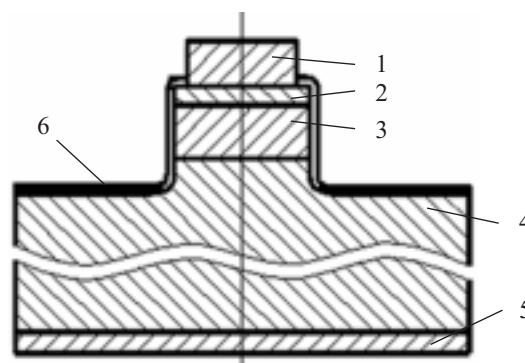


Рис. 1. Общий вид чипа карбидокремниевых $p-i-n$ -диодов: 1 — контакт к p^+ -области; 2 — p^+ -область (1 мкм); 3 — n -область (8—10 мкм); 4 — n^+ -область (150 мкм); 5 — контакты к n^+ -области; 6 — защитный слой SiO_2

СВЧ интегральных схем. Толщина i -области мезоструктуры составляет 6—8 мкм, что обеспечивает пробивное напряжение до 1000 В. Исходным материалом служили эпитаксиальные p^+-n-n^+ -структуры 4HSiC. Технологическая схема формирования 4HSiC-мезоструктуры включает в себя группу операций, обеспечивающих создание маски (Cr-Ni), а также ионно-плазменного травления незащищенных участков пластины на глубину 6—7 мкм, формирования контактов к p^+ - и n^+ -областям и порезку пластины на чипы.

Маска для селективного травления 4HSiC создавалась вакуумным напылением слоев Cr и Ni толщиной 0,05 и 0,5 мкм, соответственно, с последующим формированием защищенных областей методом фотолитографии и жидкостного травления.

Ионно-плазменное травление карбида кремния выполнялось в плазмохимическом реакторе (ПХР) с замкнутым дрейфом электронов [4—6]. Для исследования и оптимизации процесса травления в качестве опытного материала были использованы пластины кремния. Оптимизация проводилась с целью получения максимальных скоростей травления кремния при небольших значениях энергии химически активных ионов. Как показано в работе [7], при энергии ионов больше 250 эВ происходит достаточно интенсивное распыление никелевой защитной маски. Поэтому исследования проводились при значениях энергии меньше 220 эВ.

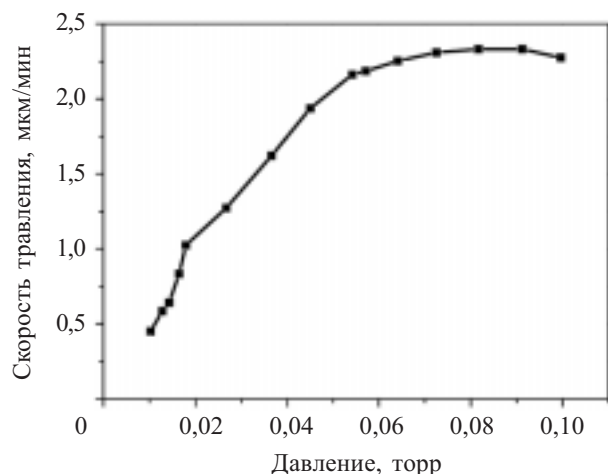


Рис. 2. Зависимость скорости травления кремния от давления рабочего газа в реакторе

В используемом ПХР применялись высокочастотные разряды в скрещенных магнитных полях, что позволяло регулировать энергию ионов и работать с химически активными ионами с энергией ниже 200 эВ. Использование плазмы с ионами относительно малых энергий позволяет проводить травление образцов без радиационных повреждений поверхности и перераспыления на поверхность образцов атомов материалов, из которых изготовлена вакуумная камера ПХР. Кроме того, наличие магнитных полей дает возможность получить высокую степень диссоциации молекул рабочего газа и ионизации атомов и реализовать более высокую скорость травления материалов, используемых в микроэлектронике.

Результаты исследований зависимости скорости травления кремния от давления рабочих газов в ПХР приведены на рис. 2. В качестве рабочего газа использовался SF_6 . Напряженность магнитного поля в ПХР составляла $1,2 \cdot 10^4$ А/м, ток высокочастотного (13,56 МГц) разряда составлял 8 А. Использовался генератор мощностью до 1 кВт со стабилизацией мощности. Скорость напуска газа оставалась постоянной, рабочее давление в реакторе регулировалось механически с помощью диффузионного насоса Н-2Т (скорость откачки 2000 л/с). Обрабатываемая площадь кремниевых пластин была одинаковой (для устранения влияния загрузки) и составляла 2,7 см². Как видно из рис. 2, при увеличении давления в реакторе до 10^{-1} торр скорость травления кремния растет от 0,7 до 2,5 мкм/мин при давлении $(6-8) \cdot 10^{-2}$ торр. Последующее увеличение давления приводит к насыщению и даже снижению скорости травления кремния. Из приведенных данных видно, что для травления кремния оптимальным давлением рабочего газа в реакторе является $(6-8) \cdot 10^{-2}$ торр. При дальнейшем увеличении давления мощности генератора становится недостаточно для диссоциации и ионизации большого количества рабочего газа.

Было также установлено, что скорость травления кремния зависит не только от давления рабочего вещества в камере, но и от величины потока рабочего газа (рис. 3). При неизменном давлении в камере,

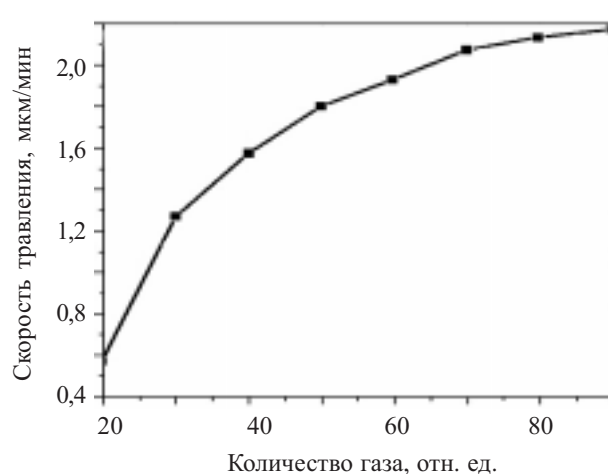


Рис. 3. Зависимость скорости травления кремния от количества рабочего газа в реакторе

близком к условиям максимальной скорости травления (около $5 \cdot 10^{-2}$ торр), увеличение количества газа в пять раз приводит к увеличению скорости травления от 0,6 до 2,2 мкм/мин. Это свидетельствует о необходимости выбора соответствующей скорости потока газа через ПХР для получения максимальных скоростей травления.

При вытравливании мезоструктур на карбиде кремния выбирались условия, при которых разряд обеспечивает наибольшую скорость травления кремния. Для реализации процесса травления должны быть разорваны химические связи и получены летучие соединения углерода и кремния. Энергия связи в молекулах 4HSiC составляет 4,48 эВ, в SiC_2 — 6,52 эВ, в Si_2C — 5,94 эВ [8]. Если в качестве химически активных ионов для травления кремния используется фтор, который может образовывать летучую молекулу SiF_4 , то для разрыва химической связи в молекуле 4HSiC можно использовать кислород, который при соединении с углеродом создает летучее вещество CO с выделением энергии, значительно превышающей энергию связи в молекулах 4HSiC , Si_2C и SiC_2 : $\text{C} + \text{O} \rightarrow \text{CO} + 11,11$ эВ. Это делает возможной реакцию замещения углерода в каждой из молекул 4HSiC с положительным энергетическим балансом. Такая же реакция возможна и для разрыва химической связи SiC с водородом в соответствии с реакцией $\text{H}_2 + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 9,51$ эВ, однако большое количество кислорода может приводить к окислению кремния с образованием связи $\text{Si} + \text{O} \rightarrow \text{SiO} + 8,35$ эВ [8], которую тяжело разорвать. Потому количество кислорода выбиралось исходя из соотношения $\text{SF}_6 : \text{O}_2 \approx 4 : 1$. Это позволило протравить мезоструктуры 4HSiC , защищенные масками никеля толщиной 0,5 мкм, до глубины 4 мкм за 140 мин при напряжении автосмещения $U_{\text{см}} = -80$ В, и до глубины 8 мкм за 140 мин при $U_{\text{см}} = -(50-70)$ В. Сила тока в разрядах составляла 7 А. Для очистки поверхности от углерода проводилась обработка образцов в кислородной плазме в течение 10 мин при напряжении автосмещения -90 В и токе высокочастотного разряда 7,5 А.

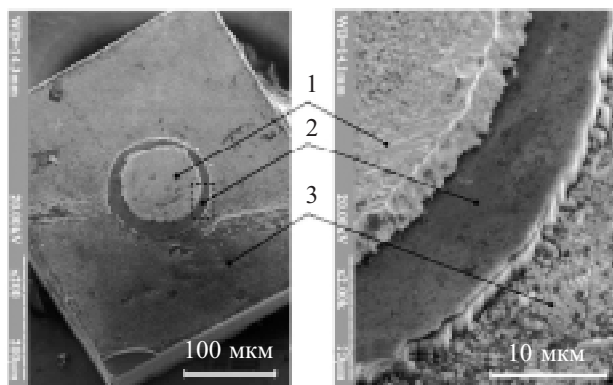


Рис. 4. Чип 4HSiC $p-i-n$ -диода (а) и увеличенный фрагмент мезаструктуры (б):

1 — контактная площадка к p^+ -области; 2 — p^+-n -мезаструктура; 3 — высоколегированная n^+ -подложка

После вытравливания мезаструктуры на глубину 4–6 мкм на пластине методом термического окисления во влажном азоте формировалась пленка SiO_2 толщиной 0,1 мкм для защиты поверхности мезаструктуры на следующих этапах техпроцесса.

Контакты к n^+ -области структуры создавались магнетронным напылением слоя никеля (0,1 мкм) с отжигом в вакууме при температуре 950°C в течение 2 мин и последующим электрохимическим осаждением на нем слоя золота толщиной 3 мкм.

Контакты к p^+ -области создавались напылением многослойной системы Al-Ti-Ni-Ti-Au и формировались в два этапа. Сначала напыленные на лицевую сторону пластины слои Al-Ti-Ni отжигались в течение 2 мин в вакууме при температуре 950°C. Затем проводилось вакуумное напыление системы Ti-Au . При окончательном формировании контакта методами фотолитографии проводили вытравливание SiO_2 в окнах и электрохимическое осаждение золота толщиной 3 мкм.

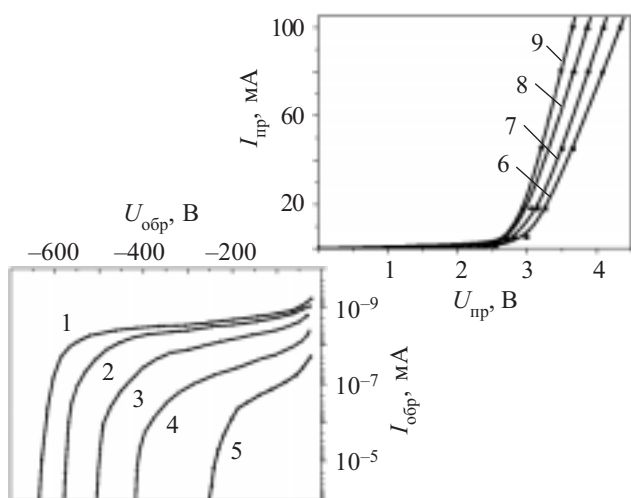


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики $p-i-n$ -диода (1–5 — обратные, 6–9 прямые ветви), измеренные при разной температуре (в °C):

1, 6 — 25; 2 — 100; 3 — 200; 4, 8 — 350; 5, 9 — 500; 7 — 150

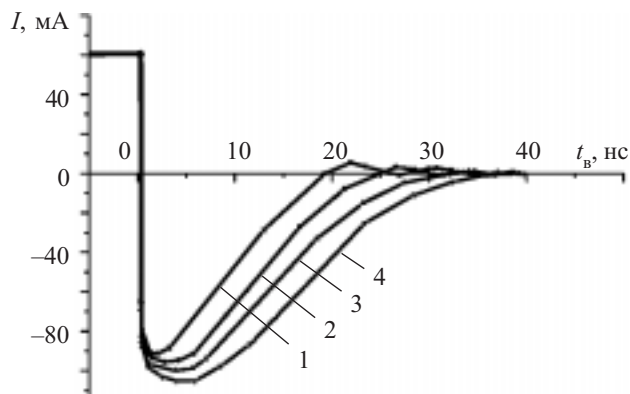


Рис. 6. Форма импульсов тока при переключении 4HSiC $p-i-n$ -диода из прямого направления в обратное, измеренного при разной температуре (в °C):

1 — 25; 2 — 150; 3 — 350; 4 — 500

Пластина с мезаструктурами разрезалась на чипы алмазными дисками толщиной 30 мкм. На **рис. 4** показана фотография чипа 4HSiC $p-i-n$ -диода с мезаструктурами, где видно, что p^+-n -мезаструктура имеет цилиндрическую форму. В верхней части мезаструктуры по периметру имеется темная полоска, которая ограничивает высоколегированный p^+ -слой. Рельеф травления n^+ -слоя имеет неоднородности, которые отражают степень неоднородности физико-химических свойств n^+ -подложки 4HSiC. Профиль травления контактной площадки на p^+ -слое является характерным для жидкостного травления и имеет угол наклона относительно плоскости p^+ -слоя порядка 60°.

На изготовленных вышеописанным методом мезаструктурах измерялись вольт-амперные характеристики с прямыми и обратными ветвями при значениях температуры 25, 100, 200, 350 и 500°C. Как видно из **рис. 5**, прямое падение напряжения при токе 100 мА при увеличении температуры с 25 до 500°C уменьшается с 4,4 до 3,7 В, что обусловлено уменьшением сопротивления диода при увеличении температуры. Обратные ветви ВАХ исследовались до величины тока 10^{-4} А. При комнатной температуре 4HSiC $p-i-n$ -диоды имеют обратное напряжение 630 В, с ростом температуры оно уменьшается и при 500°C составляет 250 В.

Процесс переключения $p-i-n$ -диодов с прямого тока (60 мкА) на обратное напряжение (10 В) исследовался в интервале температуры 25–500°C (**рис. 6**). Время восстановления диода t_v при 25°C составило 20 нс, при 500°C — 35 нс. С повышением температуры время восстановления диода увеличивается, что свидетельствует об увеличении эффективного времени жизни неосновных носителей заряда.

Закключение

Разработанный на промышленной технологической базе процесс формирования мезаструктур карбидокремниевых $p-i-n$ -диодов обеспечивает вытравливание мезаструктур высотой 4–6 мкм при энергии ионов 50–70 эВ, что исключает радиационные повреждения в приповерхностных слоях 4HSiC и не приводит к распылению защитных покрытий из никеля.

Результаты исследований ВАХ и переключения диода с прямого тока на обратное напряжение свидетельствуют о том, что мезаструктуры 4HSiC *p-i-n*-диодов, изготовленные по разработанной технологии, могут функционировать при высокой температуре — вплоть до 500°C.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лебедев А. А., Сбруев С. SiC электроника. Прошлое, настоящее, будущее // Электроника: Наука. Технология. Бизнес.— 2006.— № 5.— С. 23—41.
2. Camara N., Zekentes K., Romanov L. P. et al. Microwave *p-i-n*-diodes and switches based on SiC // IEEE Electron Device Letters.— 2006.— Vol. 27.— N 2.— P. 108—110.
3. Boltovets M. S., Basanets V. V., Camara N. et al. Investigation of packaged high-voltage 4HSiC *p-i-n*-diodes in the 20—700°C temperature range // TTP Materials Science Forum.— 2006.— Vols. 527—529.— P. 1375—1378.
4. Коновал В. М., Усталов В. В., Федорович О. А. Плазмохимический реактор с замкнутым дрейфом электронов для производства элементов с субмикронными размерами // Матер. 6-й Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Украина, г. Севастополь.— 1996.— С. 285—287.
5. Усталов В. В., Федорович О. А., Вдовенков А. А., Левицкая С. К. Плазмохимический реактор с низкой энергией ионов для селективного травления материалов // Матер. 10-й Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Украина, г. Севастополь.— 2000.— С. 434—435.
6. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов.— М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Левицкая С. К., Федорович О. А., Усталов В. В. Селективное травление многоуровневых структур в плазмохимическом реакторе с низкими энергиями ионов // Матер. 12-й Междунар. конф. «КрыМиКо—2002». — Украина, г. Севастополь.— 2002.— С. 371—373.
8. Веденеев В. И., Гурвич Л. В., Кондратьев В. Н. и др. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродства к электрону / Справочник.— М.: Химия, 1962.

НОВЫЕ КНИГИ

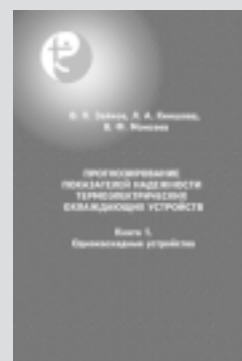
НОВЫЕ КНИГИ



Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Кн. 1. Однокаскадные устройства.— Одесса: Политехпериодика, 2009.— 120 с.

Книга посвящена оценке и прогнозированию показателей надежности однокаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств, качественному и количественному описанию этих показателей в зависимости от токового режима работы термоэлемента, величины тепловой нагрузки, условий эксплуатации, а также с учетом воздействия повышенной или пониженной температуры среды как на стадии проектирования термоэлектрического устройства, так и на стадии его эксплуатации.

Книга предназначена для инженеров, научных работников, а также студентов соответствующих специальностей, занимающихся вопросами надежности элементов электроники и в целом РЭА, и разработкой и проектированием термоэлектрических устройств.



НОВЫЕ КНИГИ



Худяков Г. И. Статистическая теория радиотехнических систем.— М.: Академия, 2009.— 400 с.

В учебном пособии кратко изложены математические основы статистической теории радиотехнических систем. Представлены основные вероятностные модели сигналов и помех в радиотехнических системах. Рассмотрены основы теории поиска, обнаружения и различения сигналов на фоне помех, статистической теории оптимального оценивания параметров сигналов, теории фильтрации и разрешения простых и сложных сигналов. Описаны основные методы расчета статистических характеристик пространственно-временных радиопомех, стохастических трасс распространения радиосигналов и эффективных площадей рассеяния радиолокационных целей.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.



К. Л. КОВАЛЕНКО, Н. Н. ШАРАН, В. В. СЕВАСТЬЯНОВ

Украина, г. Винница, НИИ «Гелий»
E-mail: helium@svitonline.comДата поступления в редакцию
17.09 2009 г.Оппонент д. т. н. В. М. КИЧАК
(ВНТУ, г. Винница)

НАНОСТРУКТУРИРОВАННАЯ КОМПОЗИТНАЯ ПЛЕНКА ДЛЯ СЕНСОРОВ ВЛАЖНОСТИ

Получена наноструктурированная композитная пленка для применения в качестве чувствительного элемента интегральных сенсоров влажности с повышенной чувствительностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Современное состояние зарубежной техники свидетельствует о высоких темпах развития электронных преобразователей физических величин (сенсоров), среди которых значительную часть составляют сенсоры влажности. Наряду с традиционным их применением (промышленность, сельское хозяйство, гидрометеорология, медицина), выделяются измерения в особо чистых технологических и активных газах (хлор, йод, аммиак) сенсорами микровлажности.

При создании интегральных сенсоров влажности возникает проблема обеспечения точности измерений малых величин влажности и стабильности эксплуатационных характеристик в условиях отрицательных значений температуры окружающей среды. Известные материалы (пленки оксидов различных металлов, органические пленки), применяемые в качестве чувствительных элементов сенсоров влажности, не обеспечивают необходимую точность измерений, чувствительность, стабильность и линейность характеристик во всем диапазоне изменения влажности. Для получения пленки, которая соответствовала бы требованиям, предъявляемым к датчикам влажности, авторами был проведен ряд исследований.

Сенсор влажности был определен как емкостной, т. е. принцип работы чувствительного слоя основан на изменении диэлектрической проницаемости при изменении влажности измеряемой среды.

Известно, что пленкам, полученным методами анодного окисления, присущи большая удельная поверхность (в силу нанопористости структуры), высокая механическая и химическая прочность [1]. Но лучшей воспроизводимостью при наличии необходимых функциональных свойств обладают пленки, сформированные методом реактивного распыления.

Работа выполнялась при поддержке Министерства промышленной политики Украины в рамках Госзаказа на научно-технологическую продукцию (договор № 92917/60)

Проведенные исследования позволили определить оптимальные состав, структуру и технологические режимы формирования пленок. Так, выявлено, что для сенсоров микровлажности наиболее пригодными являются сорбционные слои системы $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ с массовым содержанием оксида алюминия 20—40%.

Пленки формировали на кремниевой подложке (нижний электрод) с предварительно выращенными диэлектрическими слоями оксида кремния, нитрида кремния и слоем поликристаллического кремния в качестве верхнего электрода [2]. Методами планарной технологии (фотолитографии) поверхность пластины разделялась на отдельные элементы для проведения последующих исследований в составе сенсоров (рис. 1).



Рис. 1. Кремниевая пластина с композитной пленкой, разделенная на отдельные элементы

Композитная пленка $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ формировалась методом магнетронного реактивного распыления Al, Si в газовой смеси $\text{Ar}+(40\text{--}60)\%\text{O}_2$ с последующей активацией поверхности автономным источником ионов лития. При этом особенно важным является использование химически чистых и осушенных аргона и кислорода. Для получения пленок нужной стехиометрии необходимо обеспечить давление $(2,66\text{--}8)\cdot 10^{-1}$ Па в период распыления и, соответственно, химической реакции Si, Al с O_2 и осаждения их соединений на рабочие пластины. Режимы работы магнетрона рекомендуется выдерживать в пределах 1,8—2,0 А, 360—400 В [3].

Выявлена корреляция толщины пленки и ее сорбционных свойств. Наилучшие сорбционные свойства пленки удалось получить при толщине чувствительного слоя 70 нм, которая обеспечивает неравномерность 5 нм и размер зерна в пределах 10—20 нм. Для



Рис. 2. Образцы интегральных сенсоров влажности

обеспечения стабильности характеристик пленки во времени был проведен ряд технологических операций ускоренного старения.

Для проведения исследований пластина с пленкой разделялась на отдельные кристаллы, которые собирались в металлостеклянные корпуса (рис. 2).

Исследования показали, что полученная наноструктурированная композитная пленка позволяет со-

здавать интегральные сенсоры влажности с высокой чувствительностью, со стабильными во времени характеристиками, с линейной зависимостью емкости от относительной влажности практически во всем диапазоне изменения последней (от 3 до 100%) и сохраняющие работоспособность при низких температурах вплоть до -35°C .

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Технология тонких пленок (справочник) / Под ред. Л. Майсела, Р. Глэнга.— М.: Сов. радио, 1977.
2. Заявка на винахід № а2009 03672. Интегральний сенсор вологості / Коваленко К. Л., Шаран Н. Н. Севастьянов В. В.— 15.04 2009.
3. Коваленко К. Л., Шаран М. М., Севастьянов В. В. та ін. Вдосконалення плівок оксиду алюмінію інтегральних сенсорів вологості // Матер. XI міжнар. конфер. «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем». Т. 1.— Україна, м. Івано-Франківськ.— 2007.— С. 183.

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

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

Дата поступления в редакцию
19.06 2009 г.

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

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛИ КРИСТАЛЛОВ В СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ

Предложен комплексный метод количественной оценки доли кристаллов в композиционной стеклокерамике, полученной при разном времени ее спекания, базируемый на определении диэлектрической проницаемости композита.

Стеклокерамические композиционные материалы (СКМ), получившие широкое распространение в 1980-е годы [1—4], выгодно заменяют используемую в изделиях радиоэлектроники тугоплавкую алюмооксидную керамику.

По сравнению с обычными композитами СКМ обладают дополнительными потенциальными возможностями для реализации более широкого диапазона способов влияния на свойства синтезированного материала и для реализации энергосберегающих технологий [5—13].

СКМ получают экспрессным жидкофазным спеканием гомогенизированной порошковой смеси наполнителя и матричного стекла. По сравнению с алюмооксидной керамикой СКМ спекают в десятки раз быстрее при вдвое меньшей температуре: для заготовки объемом порядка 1 см^3 время выдержки при 900°C составляет всего одну минуту [5—7]. Не меньший эффект достигается и при спекании крупногабаритных изделий, когда необходимо увеличивать продолжительность нагрева для обеспечения равномерной по объему усадки и исключения нарушений за-

данной геометрии и появления внутренних напряжений в готовом изделии [11].

В условиях удорожания энергоресурсов возможность реализовывать энергосберегающие технологии изготовления стеклокерамических изделий приобретает важную практическую значимость. Благодаря этому и другим преимуществам СКМ открывается возможность для создания прогрессивных, наукоемких и быстросменяемых технологий производства конкурентоспособных изделий.

Важное место в ряду применяемых материалов занимает диэлектрический СКМ с кристаллизующимся стеклом и тугоплавким наполнителем. При достаточно длительном спекании структура такого материала и зависящие от нее свойства претерпевают изменения. Это вызвано превращением первичного стекла в композит из кристаллического компонента и остаточного стекла с отличающимися параметрами.

Объемная доля кристаллов определяет вклады компонентов в параметр композита [11]. Технологические приемы (подбор времени и температуры спекания, применяемых материалов компонентов и др.) — это лишь средство для достижения определенного значения объемной доли компонентов. Поэтому поиск оптимального для конкретной задачи состава композита, полученного при определенных технологических условиях, в конце концов сводится к установлению связи между его свойствами и объемными долями компонентов.

Количественная оценка объемной доли кристаллов особенно необходима, потому что только после ее определения можно рассчитать объемные доли остальных компонентов композита, также необходимые для оценки его свойств [11].

Определить объемную долю кристаллов в исследуемом композиционном диэлектрике можно известными инструментальными методами, однако они трудоемки, длительны, высокочувствительны, имеют ограничения и сложноприменимы в условиях производства изделий. Использование количественного рентгенофазового анализа имеет ограничения при малой доле кристаллов, затруднено сложностью наблюдаемых спектров при наличии смеси разных кристаллов [14, с. 34] (в нашем случае вторым кристаллом является наполнитель), осложнено необходимостью использования вакуума и создания эталонов стекол [15, с. 192]. Существенны затруднения и при использовании ИК-спектров поглощения [14, с. 34].

Перечисленные факты обусловили необходимость создания альтернативного, свободного от применения трудоемких и сложных инструментальных методов, способа определения доли кристаллов в диэлектрическом композите для широкого диапазона длительности спекания.

Способ достижения поставленной цели базируется на рассмотрении процессов, происходящих при спекании композита и определяющих его структуру и свойства.

Увеличение времени спекания приводит к росту кристаллов и к изменению состава остаточного стекла из-за расходования его оксида на кристаллообразование. Из-за различия плотности и диэлектрической проницаемости всех оксидов стекла, расходование оксида-кристаллообразователя сказывается на изменении относительной доли оксидов и диэлектрической проницаемости остаточного стекла [9]. Доля тугоплавкого наполнителя остается неизменной на протяжении всего процесса спекания. Поэтому на диэлектрическую проницаемость композита влияет происходящее по мере увеличения продолжительности спекания изменение отношения долей кристаллов и остаточного стекла, имеющих разную диэлектрическую проницаемость.

В определенный момент при спекании процесс кристаллизации завершается — достигается максимально возможная доля кристаллической фазы, поскольку кристаллообразующий оксид стекла расходуется без остатка. Дальнейшее спекание не ведет к изменению структуры и свойств как стекла, так и всего СКМ.

Факт наступления стабилизации свойств СКМ и образования максимальной доли кристаллов проявляется в прекращении изменения диэлектрической проницаемости композита при дальнейшем увеличении времени спекания. Это происходит благодаря прекращению изменения долей компонентов стеклофазы и их диэлектрической проницаемости.

Продолжительность спекания, после которой прекращается такое изменение, зависит от скорости роста кристаллов, количественного и качественного состава оксидов стекла, в том числе от материала и доли оксида-кристаллообразователя.

Исследование влияния на свойства композита продолжительности спекания и объемной доли кристаллов позволило выработать один из способов количественной оценки такого влияния.

Решение поставленной задачи осуществлялось комплексным методом, сочетающим первичный (измерительный) и вторичный (вычислительный) эксперименты. Упрощение было достигнуто за счет того, что экспериментальную часть ограничили определением только диэлектрической проницаемости изготовленных образцов СКМ, что всегда осуществляется при разработке и производстве любых диэлектриков, а измерение объемных долей кристаллов заменили вычислением.

Первичный (измерительный) эксперимент

Эксперимент проводили на свинцовоборосиликатном стекле следующего состава (в мас.%): SiO_2 — 38; PbO — 19; B_2O_3 — 13; Al_2O_3 — 12; ZnO — 5; MgO — 6; CaO — 7.

В качестве наполнителя был выбран глинозем ГН-1 (ГОСТ 6912–87 ТУ), имеющий 95% тугоплавкого кристаллического $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (температура плавления 2050°C). СКМ с таким же составом использовался и в [8] в качестве некристаллизующегося композита, поскольку время его спекания (10 мин) было меньше времени формирования в нем зародышей кристаллизации (25 мин) [15, с. 10].

Методика изготовления образцов СКМ из перечисленных исходных компонентов идентична приведенной в [8]. Исключение составляет температура и время спекания. Отношение массовых долей стекла m_c и наполнителя m_n составляло 0,45:0,55, а время спекания несколько превышало время, при котором прекращается наблюдаемое изменение диэлектрической проницаемости. Это давало возможность убедиться в завершении процесса кристаллизации.

Зависимость скорости роста кристаллов от температуры нагрева описывается кривой с максимумом при определенной температуре [15, с. 84, 105]. Как было установлено в [11], при спекании СКМ указанного состава в диапазоне температуры $800\text{—}970^\circ\text{C}$ материалом кристаллической фазы является кристобалит — кристаллическая модификация диоксида кремния. Его объемная доля становится максимальной при 950°C . Эта температура и была выбрана для эксперимента, т. к. скорость кристаллообразования близка к максимально возможной и процессы изменения структуры и свойств СКМ проявляются в большей степени, чем при других значениях температуры.

В изготовленных образцах определялось эффективное значение относительной диэлектрической проницаемости СКМ ϵ по величине электрической емкости, которую измеряли на частоте 1 МГц при температуре 25°C в соответствии с ОСТ 110303–86 с соблюдением требуемых размеров и количества образцов для каждого значения продолжительности их спекания τ . Измерение емкости выполнено измерителем Е7–12.

Результаты определения средних значений ϵ с отклонениями $\pm 0,01$ для различного времени спекания

Таблица 1
Диэлектрическая проницаемость СКМ, полученного
при различном времени спекания τ

τ , ч	0,5	1,0	2,0	3,5	4,5	5,0	6,0	6,5	7,0	7,4	7,8	8,2
ϵ	7,92	8,30	8,21	7,90	7,77	7,75	7,72	7,71	7,70	7,70	7,70	7,70

приведены в табл. 1. Диапазон $\tau=4,5\text{—}8,2$ ч дополняет диапазон времени, исследованный ранее в [11].

Из табл. 1 видно, что начиная примерно с семи часов спекания, диэлектрическая проницаемость в исследуемом стеклокерамическом композиционном диэлектрике перестает изменяться. Это время соответствует времени образования максимальной доли кристобалита в стекле диэлектрика τ_m . При $\tau > 7$ ч доли кристобалита и остаточного стекла, а также их диэлектрическая проницаемость остаются постоянными. Не изменяется также и диэлектрическая проницаемость наполнителя.

Полученные результаты первичного (измерительного) эксперимента использовались в качестве исходных данных при проведении дальнейших вычислений.

Вторичный (вычислительный) эксперимент

Для выполнения вычислений объемной доли кристаллов при разной длительности спекания использовалась формула, связывающая долю кристаллов со временем спекания и интенсивностью кристаллообразования [9]:

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

где $y_{\text{фс}}$ — объемная доля кристаллов в стекле СКМ;

$y_{\text{фс max}}$ — максимально возможная объемная доля кристаллов в стекле (при этом $e^{-B(\tau - \Delta\tau)} = 0$);

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

τ — время от момента достижения максимальной температуры спекания до начала ее снижения;

$\Delta\tau$ — отрезок времени от значения $\tau=0$ до начала кристаллизации стекла.

В течение времени $\Delta\tau$, которое называют инкубационным периодом, образуются ядра или зародыши кристаллизации. Согласно [15, с. 10], $\Delta\tau$ равно примерно 0,4 ч.

Формула (1) позволяет оценить зависимость коэффициента B от времени спекания τ_m , при котором объемная доля кристаллов в стекле достигает максимального значения $y_{\text{фс max}}$ по завершении кристаллообразования. С достаточно высокой степенью точности равенство

$$1 - e^{-B(\tau_m - \Delta\tau)} \approx 1, \quad (2)$$

полученное из (1) при $\tau = \tau_m$, выполняется, если величина отклика от единицы в (2) составляет 0,1%, что сопоставимо с отклонением значений ϵ в табл. 1 от приведенных средних значений. При этом

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

откуда следует, что

$$-B(\tau_m - \Delta\tau) \approx \ln(10^{-3}), \quad (4)$$

$$B \approx \frac{\ln(10^{-3})}{\tau_m - \Delta\tau} = \frac{6,9}{\tau_m - \Delta\tau} = \frac{6,9}{7 - 0,25} = 1,02. \quad (5)$$

В (5) значение $\Delta\tau$ принято равным 0,25 вместо 0,4 ч, т. к. в нашем случае начало ядрообразования происходит на 0,15 ч раньше, чем достигается температура 950°C [9].

Найденное значение коэффициента B позволяет оценить с помощью формулы (1) объемную долю кристаллов в стекле СКМ $y_{\text{фс}}$ для любой продолжительности спекания.

Значения $y_{\text{фс}}$ позволяют определить значения объемных долей кристаллов в стеклокерамическом композите $y_{\text{фк}}$, используя их взаимосвязь:

$$y_{\text{фк}} = y_{\text{фс}} y_c, \quad (6)$$

где y_c — объемная доля стекла в составе композита.

Значение y_c для рассматриваемого диэлектрика, вычисленное с помощью известной формулы [16, с. 33], составляет 0,505. При вычислениях использовались массовые доли $m_c = 0,45$, $m_n = 0,55$ и значения плотности стекла $\rho_c = 2,97 \cdot 10^3$ кг/м³ и наполнителя $\rho_n = 3,7 \cdot 10^3$ кг/м³ [11].

С учетом (6) и (1), объемная доля кристобалита в диэлектрике составит

$$y_{\text{фк}} = y_{\text{фс max}} y_c [1 - e^{-B(\tau - \Delta\tau)}]. \quad (7)$$

Значение $y_{\text{фс max}}$ в стекле композита, согласно [9, 11], составляет 0,50. Подставив в (7) $y_{\text{фс max}} = 0,50$, $y_c = 0,505$, $B = 1,02$ и $\Delta\tau = 0,25$ ч, получим формулу для вычисления $y_{\text{фк}}$ при разных значениях τ :

$$y_{\text{фк}} = 0,50 \cdot 0,505 [1 - e^{-1,02(\tau - 0,25)}]. \quad (8)$$

Значения $y_{\text{фк}}$, вычисленные с помощью (8), приведены в табл. 2 для выбранных из диапазона 0,5—8,25 ч значений τ .

Таблица 2
Объемные доли кристобалита в СКМ при разной
длительности спекания

τ , ч	$y_{\text{фк}}$	τ , ч	$y_{\text{фк}}$	τ , ч	$y_{\text{фк}}$
0,50	0,057	3,50	0,243	6,00	0,252
1,00	0,135	4,00	0,247	6,50	0,252
1,50	0,182	4,50	0,249	7,00	0,252
2,00	0,210	5,00	0,250	7,50	0,252
2,50	0,227	5,50	0,251	8,00	0,252
3,00	0,237	5,75	0,252	8,25	0,252

Обсуждение результатов

Предложенный альтернативный способ количественной оценки доли кристаллов при разной длительности спекания одной из разновидностей диэлектрического СКМ — гетерофазной трехкомпонентной структуры с катализированным зарождением кристаллической фазы — относительно прост и свободен от ограничений, присущих существующим методам. Состав и свойства такой структуры определяются тугоплавким кристаллическим наполнителем и стекло-

образной и кристаллической фазами, которые зависят от температуры и длительности спекания.

Базовая формула, доступная для инженерных расчетов при разработке материала и в процессе производства изделий из него, позволяет по значениям измеренной диэлектрической проницаемости композита оценить как эффективность кристаллообразования при выбранной температуре спекания, так и объемные доли кристаллов при любой продолжительности синтеза материала. Знание же объемной доли кристаллов позволяет прогнозировать диэлектрические и другие технические параметры СКМ с разным соотношением исходных компонентов диэлектрика и с разным содержанием кристаллической фазы. Такое прогнозирование позволяет существенно сократить дорогостоящие и длительные эксперименты при разработке СКМ, выбрать оптимальный вариант прогнозируемой характеристики, особенно для габаритных изделий, время спекания которых увеличивают для сохранения их геометрии.

Примером улучшения свойств диэлектрика является повышение его прочности за счет выбора оптимального состава и реализации такого режима синтеза, при котором удачно сочетаются геометрически упорядоченные прочные кристаллы с менее упругим аморфным остаточным стеклом [15, с. 189—190]. При таком сочетании снижающие прочность трещины появляются только при высоких разрушающих нагрузках. Увеличению прочности способствует и введение в СКМ более прочного наполнителя, препятствующего передвижению разрушающих дислокаций [17, с. 9].

Метод количественной оценки доли кристаллов может использоваться и для материалов без наполнителя, изготавливаемых методами литья стекла или порошковой металлургии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Композиционные материалы / Под общ. ред. Л. Браутмана, Р. Крока. Том 3. Применение композиционных материалов в технике / Под ред. Б. Нотона. — М.: Машиностроение, 1978.
2. Shimada Y., Utsumi K., Nakayama M. Firing low temperature multilayer glass-ceramics substrate // IEEE transaction of components, hybrids and manufacturing technology. — 1983. — Vol. 6, N 4. — P. 382—386.

3. Лаймен Д. Главная тема конференции по электронным компонентам // Электроника. — 1983. — Т. 56, № 1. — С. 72—74.

4. Pat. 2172282A GB. Toughened glass-ceramics / G. Partridge, M. I. Budd. — 1986.

5. Дмитриев М. В. Композиционная радиостеклокерамика // Труды Одесского политехнического университета. — 1999. — Вып. 2 (8). — С. 209—211.

6. Дмитриев М. В. Стеклокерамические основания резисторов // Труды Одесского политехнического университета. — 1999. — Вып. 1 (7). — С. 89—91.

7. Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И., Панова Е. Л. Стеклокерамические основания конденсаторов // Тр. 9-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2008». — Одесса. — 2008. — Т. II. — С. 84.

8. Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И., Панова Е. Л. Прогнозирование диэлектрических свойств некристаллизующейся моноармированной полиматричной стеклокерамики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 5. — С. 58—62.

9. Дмитриев М. В., Еримичой И. Н., Панов Л. И. Оценка параметров моноармированной стеклокерамики со стеклокристаллической матрицей // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 2. — С. 51—57.

10. Дмитриев М. В. Влияние концентрации компонентов и пор на диэлектрическую проницаемость стеклокерамики // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1997. — № 4. — С. 34—39.

11. Дмитриев М. В. Влияние режимов спекания на параметры стеклокерамики с кристаллизуемым стеклом // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 1. — С. 36—39.

12. А. с. 1782947 СССР. Стеклокерамический композиционный материал / Л. В. Буран, М. В. Дмитриев, В. Д. Лемза, Л. Н. Тартаковская. — 1992. — Бюл. № 3.

13. Пат. 34585 України. Спосіб виготовлення стеклокерамічного виробу / М. В. Дмитрієв, І. М. Єрмічой, Л. І. Панов. — 11.08.08.

14. Безбородов М. А. Самопроизвольная кристаллизация силикатных стекол. — Минск: Наука и техника, 1981.

15. Безбородов М. А. Стеклокристаллические материалы. — Минск: Наука и техника, 1982.

16. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — Л.: Энергия, 1974.

17. Композиционные материалы / Под ред. В. В. Васильева и Ю. М. Тарнапольского. — М.: Машиностроение, 1990.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Симонов Б. М., Заводян А. В. Технологические основы микроэлектроники. Ч. 2 / Под ред. С. П. Тимошенкова. — М.: МИЭТ, 2009. — 164 с.

Вторая часть пособия включает сведения о технологиях создания селективно легируемых областей в полупроводнике, формирования рисунка в функциональных слоях СБИС, а также о требованиях к чистоте помещений и поверхностей полупроводников в субмикронной технологии. Представлены наиболее важные теоретические положения, раскрывающие сущность рассматриваемых процессов и направлений их развития.

Материал пособия может быть полезен студентам, аспирантам и специалистам, занятым в сфере микроэлектроники, в частности субмикронных технологий.

И. И. КРИВАЛЬ, А. И. СКРИПНЮК, В. А. ПРОЦЕНКО,
А. В. МАРЬЕНКО

Украина, г. Киев, ОАО «Меридиан» им. С. П. Королева.
E-mail: Feedback@meridian.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
18.08 2009 г.

Оппонент А. Г. ЯЦУНЕНКО
(ИТМ, г. Днепропетровск)

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ЦИФРОВЫЕ ЧАСТОТОМЕРЫ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Рассмотрен принцип действия, области применения, краткие технические и метрологические характеристики серийно выпускаемых ОАО «Меридиан» СВЧ-частотометров.

Непременным условием развития науки, техники и производства является опережающее развитие современной контрольно-измерительной аппаратуры и средств метрологического обеспечения.

Среди них важное место занимают частотометры — приборы для измерения частоты синусоидальных сигналов и несущей частоты радиоимпульсных сигналов, которые широко применяются в таких областях техники как связь, телевидение, радиолокация, радионавигация, а также на предприятиях радиоэлектронного профиля.

В последние годы ОАО «Меридиан» им. С. П. Королева, которое имеет более чем сорокалетний опыт работы в этой области, разработало и серийно выпускает ряд частотометров, перекрывающих частотный диапазон от долей герца до 40 ГГц.

В линейке предлагаемых частотометров представлены такие модели как UA ЧЗ-63/3, UA ЧЗ-79М, UA ЧЗ-101, позволяющие максимально охватить спектр возможных применений.

Частотометр UA ЧЗ-63/3 удобно использовать при работе как с синусоидальными, так и с импульсными сигналами в жестких условиях эксплуатации.

Частотометр UA ЧЗ-79М незаменим при измерении частоты сигналов в широком диапазоне частот от звуковых до 18 ГГц и там, где необходима высокая чувствительность прибора и точность измерений.

Частотометр UA ЧЗ-101 найдет широкое применение у потребителей, которые работают в 8-миллиметровом диапазоне волн с радиоимпульсными сигналами.

Единственный частотометр из числа выпускаемых в странах СНГ, который позволяет производить точные измерения несущей частоты радиоимпульсных сигналов наносекундной длительности с высокой точностью — UA ЧЗ-101.

Рассмотрим частотометр UA ЧЗ-63/3. Принцип его действия основан на счетно-импульсном методе, заключающемся в том, что счетный блок подсчитывает количество поступающих на его вход импульсов опорной частоты, сформированных из входного сиг-

нала за определенный интервал времени. Частотометр многофункционален и предназначен для:

- автоматического измерения частоты синусоидальных сигналов и частоты следования импульсных сигналов;
- измерения периода синусоидальных и периода следования импульсных сигналов;
- измерения длительности импульсов;
- измерения отношения частот;
- суммирования числа электрических колебаний.

Прибор принят к эксплуатации Министерством обороны, выгодно отличается от своих аналогов малой потребляемой мощностью (25 В·А), рабочими условиями эксплуатации (от -30 до $+50^{\circ}\text{C}$), наличием интерфейсов канала общего пользования (КОП) и RS-232, высокой верхней частотой измерения (3,2 ГГц).

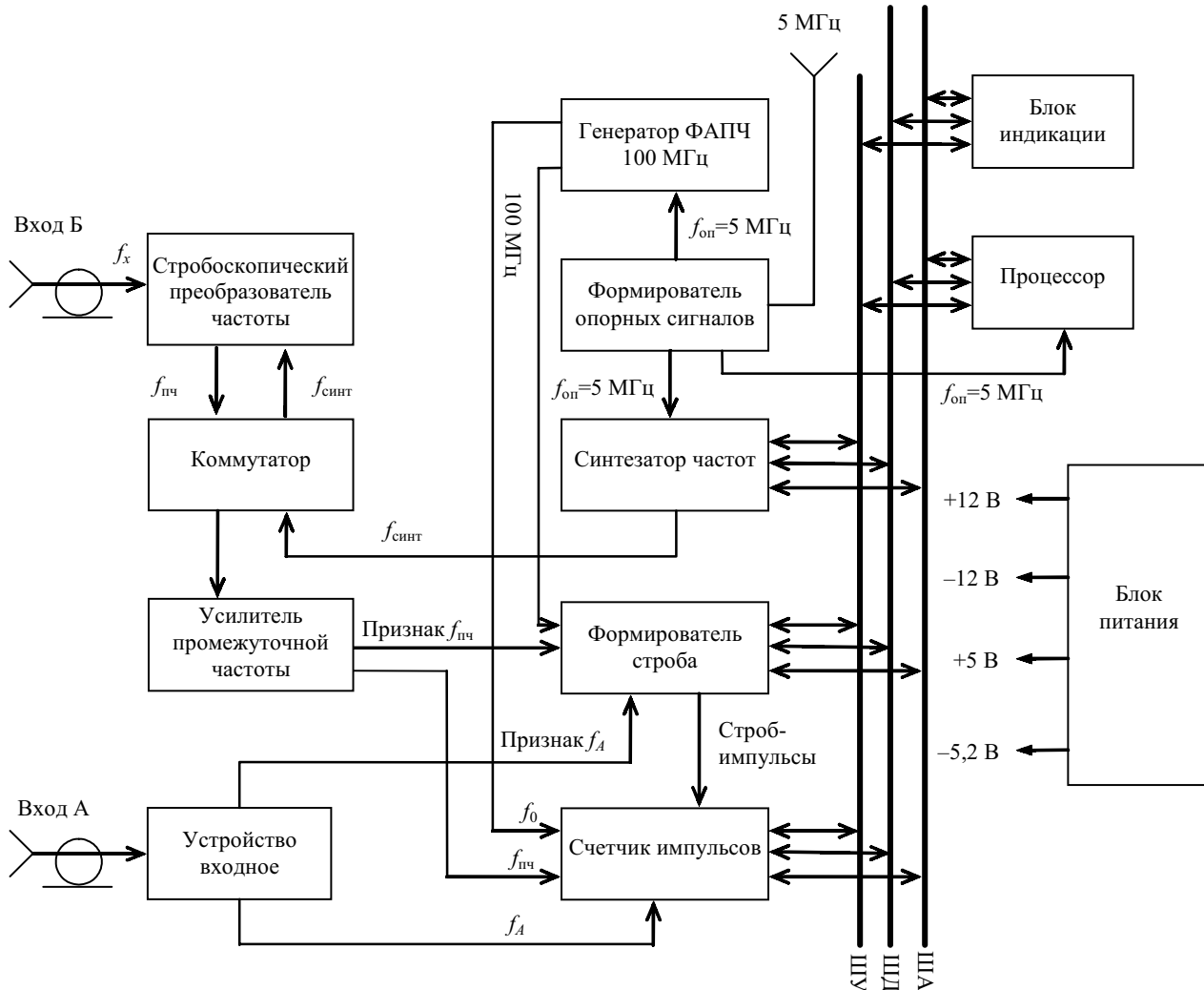
Принцип действия частотометра UA ЧЗ-79М в диапазоне частот до 330 МГц основан на прямом счете, а в диапазоне частот от 0,33 до 18 ГГц — на преобразовании частоты входного сигнала в частоту прямого счета частотометра. Структурная схема прибора приведена на рисунке.

В режиме измерения частоты в диапазоне до 330 МГц измеряемый сигнал поступает на входное устройство, которое состоит из двух усилителей. Один из них работает в диапазоне частот от 10 Гц до 100 МГц, другой — от 100 до 330 МГц. Переключение входов усилителей осуществляется сигналами управления.

Усиленный и сформированный цифровой сигнал поступает на счетчик, а признак наличия промежуточной частоты (признак $f_{\text{пч}}$) — на формирователь строба. Код входа поступает на адресные входы схемы выбора канала с шины данных по команде с процессора. Дальше сигнал поступает на селектор в счетчике, на другой вход которого поступают стробирующие импульсы с формирователя строба.

В формирователе происходит формирование стробирующих импульсов с использованием признака наличия сигнала промежуточной частоты (ПЧ) и опорного сигнала частотой 100 МГц.

В счетчике импульсов происходит суммирование периодов до получения заданной длительности строба, которая представляет собой время счета и может принимать значения от 10 до 10^{-7} с.



Структурная схема прибора УАЧЗ-79М

Пачка импульсов, сформированная из измеряемого сигнала в селекторе за время, равное длительности строба, поступает сначала на делитель частоты на 8, а дальше — на многоразрядный двоичный счетчик. Счетчик подсчитывает количество поступающих импульсов, а результат измерения по шине данных поступает на табло прибора.

В режиме измерения частоты в следующем диапазоне — от 0,33 до 18 ГГц — измеряемый сигнал с частотой f_x поступает на вход стробоскопического преобразователя частоты, на другой вход которого через коммутатор поступает сигнал от синтезатора частоты.

Синтезатор частоты перестраивается по команде с микропроцессора в диапазоне от 329 до 476 МГц. Шаг перестройки составляет 200 кГц.

Коммутатор служит для коммутации сигналов промежуточной частоты $f_{пч}$ и частоты синтезатора $f_{синт}$.

В процессе перестройки синтезатора в стробоскопическом преобразователе происходит преобразование сигнала входной измеряемой частоты на частотах синтезатора. Продуктом преобразования является промежуточная частота $f_{\text{пч}}$. Однокодовой синтезатор частоты выполнен по методу косвенного син-

теза с использованием делителя частоты с переменным коэффициентом деления в цепи обратной связи системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и состоит из перестраиваемого генератора устройства ФАПЧ и делителя частоты с переменным коэффициентом деления. Выходная частота синтезатора задается кодами, поступающими по шине данных из микропроцессора. В качестве опорного в устройстве ФАПЧ используется сигнал частотой 5 МГц.

Сигнал промежуточной частоты $f_{пч}$ с выхода преобразователя частоты через коммутатор поступает на усилитель ПЧ. Далее сигнал поступает на счетчик, где происходит измерение $f_{пч}$.

В усилителе промежуточной частоты также происходит формирование признака $f_{пч}$. Наличие признака $f_{пч}$ (сигнал логической «1») говорит о том, что промежуточная частота находится в диапазоне от 40 до 130 МГц.

Сигнал признака поступает на формирователь стро-
ба и участвует в формировании импульсов стро-
ба во время действия сигнала огибающей.

Частота входного сигнала вычисляется по формуле

$$f_x = N f_{\text{синт}} \pm f_{\text{пч}}, \quad (1)$$

где N — номер гармоники частоты синтезатора, на которой произошло преобразование частоты входного сигнала. Номер гармоники N , а также знак приращения $f_{\text{пч}}$ (плюс или минус) определяются путем пятикратного изменения частоты синтезатора с последующим измерением величины промежуточной частоты, соответствующей частоте синтезатора. Определение номера гармоники синтезатора происходит при фиксированном времени счета (1 мс).

Рассмотрим алгоритм работы прибора в режиме измерения частоты входного сигнала. Кодом с шины данных (ШД) устанавливается верхняя частота синтезатора 476 МГц. Затем следует пошаговая перестройка частоты синтезатора, который находится в режиме синхронизации, до появления сигнала промежуточной частоты (наличие признака $f_{\text{пч}}$).

При получении признака $f_{\text{пч}}$ перестройка прекращается. В этот момент происходит вычисление и запоминание частоты синтезатора $f_{\text{синт1}}$ и измерение промежуточной частоты $f_{\text{пч1}}$. По команде с процессора, частота синтезатора увеличивается на 1600 кГц, и снова происходит вычисление и запоминание частоты синтезатора ($f_{\text{синт2}}$) и измерение промежуточной

частоты ($f_{\text{пч2}}$). После этого вычисляется и запоминается номер гармоники

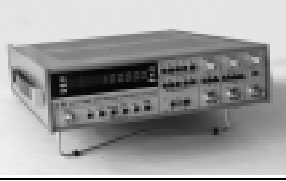
$$N_1 = \frac{|f_{\text{пч2}} - f_{\text{пч1}}|}{|f_{\text{синт2}} - f_{\text{синт1}}|}. \quad (2)$$

По следующей команде с процессора частота синтезатора уменьшается на 1600 кГц и происходит измерение и запоминание номера гармоники N_2 . Процедура повторяется пятикратно, измеренные значения гармоник (N_1 — N_5) округляются до двух значащих цифр и сравниваются. При их равенстве номер гармоники заносится в память прибора, где происходит вычисление измеряемой частоты по формуле (1). Следует учесть, что если $f_{\text{пч2}} > f_{\text{пч1}}$, то приращение $f_{\text{пч}}$ имеет знак «минус», а если $f_{\text{пч2}} < f_{\text{пч1}}$ — то знак «плюс».

Принцип действия **частотомера UA ЧЗ-101** в диапазоне частот до 18 ГГц такой же, как и у рассмотренного выше частотомера UA ЧЗ-79М.

В диапазоне частот до 40 ГГц измеряемый сигнал подается на выносные волноводные стробоскопические преобразователи частоты, работающие в поддиапазоне частот от 17,44 до 25,95 и от 25,95 до 40 ГГц. Сечение каналов волноводов этих преобразователей 11×5,5 и 7,2×5,4 мм, соответственно. В про-

Краткие технические характеристики частотомеров

	UA ЧЗ-63/3	UA ЧЗ-79М	UA ЧЗ-101
			
Диапазон частот	0,1 Гц — 3,2 ГГц	10 Гц — 18 ГГц	10 Гц — 40 ГГц
Минимальный уровень входного сигнала	30 мВ, 100 мВ, 15 мкВт, 50 мкВт, 100 мкВт	50 мВ, 20 мкВт, 100 мкВт	50 мВ, 20 мкВт, 100 мкВт
Максимальный уровень	20 мВт	5 мВт	5 мВт
Стабильность частоты опорного генератора за 30 сут 12 мес	$\pm 10^{-7}$ $\pm 2 \cdot 10^{-7}$	$\pm 10^{-7}$ $\pm 2 \cdot 10^{-7}$	$\pm 10^{-7}$ $\pm 2 \cdot 10^{-7}$
Разрешающая способность	1 Гц/с	1 Гц/с	1 Гц/с
Потребляемая мощность	25 В·А	45 В·А	45 В·А
Питание прибора	220±22 В, 50 Гц 220±11 В или 115±5,75 В, 400 Гц	220±22 В, 50 Гц	220±22 В, 50 Гц
Условия эксплуатации	–30...+50°C	–10...+50°C	–10...+50°C
Масса	4,5 кг	5 кг	5 кг
Габариты	312×95×342 мм	307×115×312 мм	307×115×312 мм
Интерфейс	КОП, RS-232	КОП, RS-232	КОП, RS-232

цессе измерения входной частоты смещение частоты синтезатора равно 1200 или 800 кГц.

Особенностью частотомера UA ЧЗ-101 является более широкий диапазон измеряемой частоты и возможность автоматического измерения несущей частоты радиоимпульсных сигналов в диапазоне от 100 МГц до 40 ГГц. Алгоритм измерения среднего значения несущей частоты радиоимпульсных сигналов аналогичен алгоритму измерения частоты гармонических сигналов, описанному выше.

Отличие состоит в формировании импульса стро-ба (времени счета), который в этом случае состоит из суммы отдельных импульсов, суммарное время которых будет равно установленному времени счета. Это связано с тем, что каждая отдельная составляющая стро-ба будет иметь место только в момент наличия огибающей радиоимпульса, другими словами — в момент действия радиоимпульса.

Для примера рассмотрим радиоимпульсы длительностью 300 нс с частотой заполнения, равной промежуточной частоте $f_{пч} = 100$ МГц, полученной в результате стробоскопического преобразования входного сигнала СВЧ. Огибающая радиоимпульса будет иметь длительность порядка 250 нс, т. е. будет короче длительности реального радиоимпульса на 50 нс.

Формирование отдельной составляющей стро-ба происходит за счет заполнения огибающей импульсами опорной частоты $f_{оп} = 100$ МГц.

Для получения стро-ба длительностью 10 мс необходимо 10^6 периодов опорной частоты ($10^6 = 10 \cdot 10^{-3} / 10^{-8}$), этот строб будет состоять из суммы n отдельных пачек импульсов, где $n = 10$ мс / 250 нс = 40000 пачек импульсов.

Использование в качестве преобразователей частоты стробоскопических преобразователей частоты позволило максимально упростить схему измерения, т. е. использовать одно СВЧ-устройство, что способствовало получению высоких эксплуатационных и метрологических характеристик. В частотомерах UA ЧЗ-79М и UA ЧЗ-101 для диапазона частот до 18 ГГц стробоскопический преобразователь выполнен в микрополосковом исполнении и встроен в прибор, а в приборе UA ЧЗ-101 для диапазона частот до 40 ГГц — в волноводном исполнении и конструктивно выполнен как выносной, что создает большие удобства при измерении.

Современная элементная база приборов обеспечивает высокие параметры надежности.

Частотомеры UA ЧЗ-63/3, UA ЧЗ-79М, UA ЧЗ-101 имеют малогабаритные переносные корпуса, эргономичны и просты в управлении.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

По многочисленным просьбам Российских предприятий компания JTAG Technologies выпустила «Руководство по тестопригодному проектированию печатных плат» на русском языке.

Брошюра содержит рекомендации для разработчиков цифровой техники, выполнение которых позволит сделать тестирование плат при помощи технологии периферийного (граничного) сканирования более эффективным. Как известно из различных публикаций, для реализации данной технологии необходимо, чтобы хотя бы одна микросхема на проектируемой плате соответствовала стандарту IEEE 1149.1 (JTAG). Это требование зачастую уже выполнено, если устройство содержит в своем составе современные процессоры, микроконтроллеры и ПЛИС, и тестирование и диагностика таких плат при помощи JTAG осуществима без дополнительных мероприятий. Однако следование рекомендациям по тестопригодному проектированию позволяет добиться максимального тестового покрытия платы и возможных неисправностей.

Брошюра также содержит некоторые советы по оптимизации скорости программирования микросхем флэш-памяти на смонтированных платах, что может оказаться важным при крупносерийном производстве.

Брошюру в печатном виде можно заказать бесплатно на сайте JTAG Technologies www.jtag-technologies.ru или у официального дистрибьютора компании — Предприятия Остек.

Продукция компании JTAG Technologies широко используется для тестирования плат и диагностики дефектов при разработке, опытной и серийном производстве, а также сервисном обслуживании электронных изделий.



АННОТАЦІЇ К СТАТТЯМ НОМЕРА

Індуктивність, що перестроюється електричним полем. Семенов А. А., Усанов Д. А.

Показана можливість створення мініатюрного пасивного індуктивного елементу, що перестроюється під впливом електричного поля. Приведено експериментальні залежності характеристик такої котушки від величини управляючої напруги. Дани рекомендації по практичному застосуванню індуктивних елементів пропонованої конструкції.

Гібридний автодинний сенсор магнітного резонансу. Брайловський В. В., Верига А. Д., Політанський Л. Ф.

Приведено конструкцію автодинного сенсора у вигляді вимірювальної комірки, який забезпечує спостереження однокатушковим методом геліконного резонансу і отримання сигналів ЕПР, визначення кінетичних характеристик напівпровідникових матеріалів безконтактним методом на частотах порядку 500 МГц в температурному діапазоні 77—300 К.

Установка для вимірювання питомого коефіцієнта сили світла матеріалів зі світлоповертаючим ефектом. Бутенко В. К., Добровольський Ю. Г., Шабашкевич Б. Г., Юр'єв В. Г.

Розроблено установку для вимірювання питомого коефіцієнта сили світла світлоповертаючих поверхонь у відповідності ДСТУ 4100-2002. Конструкція установки забезпечує більш широкий в порівнянні з аналогами діапазон вимірювання — від 10^{-1} до 10^4 кд/(лк·м²). Величина основної відносної припустимої похибки вимірювань складає не більше $\pm 15\%$.

Оптимізація процесу пошуку невідомої кількості рухомих об'єктів. Гришин І. Ю.

Пропонується метод оптимізації процесу пошуку невідомої кількості рухомих об'єктів системою радіолокації з фазованими антенними ґратами в умовах стохастичної невизначеності, що дозволяє істотно скоротити середній час їх пошуку.

Оптимізація конструкції мембранних датчиків. Рубцевич І. І., Висоцький В. Б., Ковальчук Н. С.

Розглянуто можливість зменшення потужності, що споживається датчиком концентрації газу за рахунок введення щілин в структуру багатошарової мембрани. Для збільшення ефективної площі контакту платини з підшаром пористого алюмінію запропоновано проводити розтравлення вершин пір в концентрованій ортофосфорній кислоті.

Дружинін А. О., Голота В. І., Козут І. Т., Ховерко Ю. М. Розробка схеми і топології елементів матриці керованих автоемісійних кремнієвих мікрокатодів.

Показано приклади приладних елементів для мікросистемних застосувань, які сформовані на локальній тривимірній КНІ-структурі. Встановлено область застосу-

Electrical field controlled inductance. Semenov A. A., Usanov D. A.

The possibility of creation a miniature passive electrical field controlled inductive unit has been shown. The experimental dependences of such inductance on the control of operating voltage have been presented. The recommendations on practical application of the proposed inductive element's construction have been given.

Hybrid autodyne sensor of a magnetic resonance. Brajlowskyj V. V., Veriga A. D., Politsanskyj L. F.

An autodyne sensor designed as a measuring cell is proposed in this paper. It provides observation of a helicon resonance using one-coil method and obtaining of electron spin resonance (ESR) signals. The developed sensor also allows to determine kinetic characteristics of semiconductors by contactless method at frequencies of ~ 500 MHz in the temperature range from 77 to 300 K.

The installation for measuring of specific coefficient of force light materials with turn of light effect. Butenko V. K., Dobrovolskiy Yu. G., Shabashkevich B. G., Yuriev V. G.

The installation for measuring of specific coefficient of candle-power light of returning surfaces on the accordance of ДСТУ 4100-2002 is developed. The construction of installation provides more wide in comparison with analogues range of measuring — from 10^{-1} to 10^4 kd/(lk·m²). Limit of the basic assumed relative error of measuring is no more than $\pm 15\%$.

Search process optimization of unknown amount of train objects. Grishin I. Yu.

A method of search process optimization of unknown amount of train objects is offered. A method is used for the radiolocation system in the conditions of stochastic vagueness and allows to shorten substantially mean time of objects search.

The optimization of design of the membrane sensor. Rubceevich I. I., Wysotsky V. B., Kovalchuk N. S.

The possibility of reducing the power consumed by the gas concentration sensor through the introduction of cracks in the structure of multi-layered membrane has been considered. The conduction of etching of the peaks of pores in concentrated orthophosphoric acid for increasing of the effected area of contact of platinum with sub layer of porous aluminum has been suggested.

Development of the circuit and layout of elements of an operated field emission silicon microcathodes matrix. Druzhinin A. A., Holota V. I., Kogut I. T., Khoverko Ju. M.

Examples of device elements for microsystems, developed on local three-dimensional structure are shown. The application area of compact EKV models of the MOS-

вання компактної EKV-моделі МОН-транзистора для розрахунку характеристик КНІ МОН-транзисторів. Порівнюються розрахункові і експериментальні вихідні характеристики КНІ МОН-транзистора, в якому підканальна область з'єднана із витоком. Розроблено схему керування кремнієвим мікрокатодом, яка забезпечує лінійну зміну автоемісійних струмів при фіксованій напрузі на електродах. Розроблено топологію мікрокатада, інтегрованого зі схемою керування, яку можна тиражувати в матриці великих розмірів.

Вольт-фарадні вимірювання в тонкоплівкових епітаксialних структурах GaAs. Горєв М. Б., Кодзхеспірова І. Ф., Привалов Є. М.

Показано, що вольт-фарадні характеристики, що мають ділянки крутого падіння, зокрема вольт-фарадні характеристики тонкоплівкових структур GaAs, можуть бути виміряні при помірно малих амплітудах змінної напруги (порядку 100 мВ) за рахунок проведення вимірювань на двох різних амплітудах. Цей висновок підтверджено результатами числового розрахунку позірної ємності епітаксialних структур GaAs.

Фотоприймачи ультрафіолетового випромінювання на основі тонких плівок ZnS. Бобренко Ю. М., Ярошенко М. В., Шереметова Р. І., Семікіна Т. В., Атаєв Б. С.

Отримано високоефективні фотодіоди на основі гетеропереходу $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}/\text{CdSe}/\text{Mo}$ з варіюваною товщиною внутрішнього перехідного шару. Показано, що ефективним методом зниження чутливості за межою УФ-області є граничне зменшення товщини варизонного шару.

Вимірювання ВАХ імпульсних кремнієвих ЛПД на ділянці лавинного пробою. Кудрик Я. Я.

Розглянуто аспекти вимірювань вольт-амперних характеристик імпульсних лавинно-пролітних діодів (ЛПД). Визначено основні параметри ВАХ імпульсних ЛПД: густина критичного струму, стрибок напруги на ділянці негативного диференціального опору, напруга лавинного пробою. Приведено спосіб визначення температурного опору ділянки « p - n -перехід—корпус», необхідного для розрахунку режиму роботи ЛПД. Показано можливість використання величини ΔU для прогнозування ранніх відмов ЛПД.

Прогнозування показників надійності двохкаскадного термоелектричного охолоджуючого пристрою в режимі $Q_{0\max}$. Зайков В. П., Киншова Л. А., Казанжі Л. Д., Храмова Л. Ф.

Отримано співвідношення для оцінки показників надійності двохкаскадних ТЕП різної конструкції залежно від їх основних значущих параметрів в режимі $Q_{0\max}$. Наведено результати розрахунків для перепадів температури $\Delta T=60, 70, 80$ К з урахуванням теплового навантаження і температурної залежності параметрів, а також в режимі теплового насоса (при $\Delta T=0$). Проведено оцінку максимальної холодопродуктивності двохкаскадних ТЕП різної конструкції для різних умов експлуатації.

transistor for calculation of SOI MOS-transistors characteristics has been established. The calculated and experimental output characteristics of the SOI MOS-transistor, in which the under channel area is connected to a source, have been compared. The control circuits of the silicon microcathode, providing linear change of field emission currents at the fixed voltage on electrodes have been developed. The layout of the microcathode, integrated with the control circuit, which can be multiplied into large size matrixes have been designed.

Capacitance-voltage measurements in GaAs thin-film epitaxial structures. Gorev N. B., Kodzhespriova I. F., Privalov E. N.

It is shown that capacitance-voltage characteristics that feature steeply dropping regions, in particular those of GaAs thin-film structures, may be measured at moderately small amplitudes of the measuring AC voltage (of the order of 100 mV) at the expense of taking measurements at two different amplitudes. This conclusion is confirmed by the results of numerical calculation of the apparent capacitance of GaAs epitaxial structures.

Ultraviolet photosensors based on ZnS thin films. Bobrenko Yu. N., Yaroshenko N. V., Sheremetova G. I., Semikina T. V., Atdaev B. S.

High efficient photodiodes on the base of $p\text{-Cu}_{1.8}\text{S}/n\text{-ZnS}/(\text{ZnS})_x(\text{CdSe})_{1-x}/\text{CdSe}/\text{Mo}$ -structure with variband interlayer were fabricated. Optimization of this layer thickness was shown to be efficient method of reduction of photosensitivity behind UV region while preserving one in UV region.

The measurements of pulsed I-V-curves for silicon IMPATT diodes in the avalanche breakdown region. Kudryk Ya. Ya.

Some aspects of measurement of I-V-curves for IMPATT diodes are considered. There were determined the main parameters of the pulsed I-V-curves for IMPATT diodes: density of critical current, voltage step in the region of negative differential resistance and avalanche breakdown region. A method for determination of p - n junction-package thermal resistance that is required for calculation of IMPATT diode operating mode is given. A possibility to use ΔU magnitude for prediction of early failures of IMPATT diodes was demonstrated.

Forecasting of parameters of reliability two-cascade thermoelectrical cooling device in a mode $Q_{0\max}$. Zaykov V. P., Kinshova L. A., Kazanji L. D., Khranova L. F.

The parities for an estimation of parameters of reliability two-cascade TED of a various design depending on their basic parameters in a mode $Q_{0\max}$ are received. The results of accounts for differences of temperature $\Delta T=60, 70, 80$ K in view of thermal loading and temperature dependence of parameters, and also in a mode of the thermal pump (at $\Delta T=0$) are given. The estimation maximal coldproductivity two-cascade TED of a various design for various conditions of operation is carried out.

Кореляція параметрів арсенід-галієвих епітаксійних шарів і технології їх вирощування. Карімов А. В., Йодгорова Д. М., Якубов Е. Н.

Експериментально встановлено кореляцію рухливості і концентрації носіїв заряду і умов вирощування методом рідкофазної епітаксії арсенід-галієвих шарів. Змінюючи параметри технологічного процесу вирощування, можна отримати шари з необхідною рухливістю і концентрацією носіїв заряду.

Дослідження похибки опору тонкоплівкового резистора. Спірін В. Г.

Розглянуто конструкцію тонкоплівкового резистора без контактних площадок покриття резистивного елементу і провідника. Досліджена залежність похибки опору такого резистора від несуміщення фотошаблону з провідним шаром підкладки при другій фотолітографії, яка досягає свого максимального значення при коефіцієнті форми резистора, що дорівнює 1,0.

Формування мезаструктур 4HSiC $p-i-n$ -діодів методом іонно-плазмового травлення. Болтовець М. С., Борисенко А. Г., Іванов В. М., Федорович А. О., Кривуца В. А., Полозов Б. П.

Представлено результати дослідження та оптимізації процесу формування мезаструктур 4HSiC $p-i-n$ -діодів на промисловій технологічній базі. Досліджено вольт-амперні характеристики та характеристики перемикання $p-i-n$ -діодів в інтервалі температури 25—500°C.

Наноструктурована композитна плівка для сенсорів вологості. Коваленко К. Л., Шаран М. М., Севаст'янов В. В.

Отримано наноструктуровану композитну плівку, яка дозволяє створювати інтегральні сенсори вологості з високою чутливістю, зі стабільними в часі характеристиками, з лінійною залежністю ємності від відносної вологості практично у всьому діапазоні змін останньої (від 3 до 100%), які зберігають працездатність при низьких температурах до -35°C.

Спосіб визначення частки кристалів у склокерамічному діелектрику. Дмитрієв М. В., Єрмічой І. М., Панов Л. І.

Запропоновано комплексний метод оцінки частки кристалів у композиційній склокераміці при різному часі її спікання, що базується на визначенні діелектричної проникності композита та не потребує застосування складних і трудомістких інструментальних способів ідентифікації частки кристалів.

Малогабаритні цифрові частотоміри надвисоко-частотного діапазону. Криваль І. І., Скрипнюк О. І., Проценко В. О., Мар'єнко А. В.

Розглянуто принципи дії, сфери застосування, короткі технічні і метрологічні характеристики частотомірів UA ЧЗ-63/3, UA ЧЗ-79М, UA ЧЗ-101.

The correlation between parameters of gallium arsenic epitaxy layers and technology of growth's process. Karimov A. V., Yodgorova D. M., Yakubov E. N.

The correlation between mobility and carriers concentration and growth's conditions of gallium arsenic layers by liquid phase epitaxy is established. It is possible to obtain layers with required mobility and concentration of charge carriers by changing of technology parameters of growth's process.

Study of thin-film resistor resistance error. Spirin V. G.

A relationship between a thin-film resistor resistance error and mask misalignment with a substrate conductive layer at the second photolithography stage for a thin-film resistor design in which the resistive element does not overlap conductor pads is studied. The error value is at a maximum when the resistor aspect ratio is equal to 1.0.

Forming of 4HSiC $p-i-n$ -diodes mesastructures by the ion-plasmas etching method. Boltovets M. S., Borisenko A. G., Ivanov V. N., Fedorovich A. O., Krivutsa V. A., Polozov B. P.

The results of research and optimization of 4HSiC $p-i-n$ -diodes mesastructures manufacturing method are presented as well as analysis of current-voltage characteristics and switching characteristics of $p-i-n$ -diodes in the 25—500°C temperature range.

Nanostructure composite film for sensor controls of humidity. Kovalenko K. L., Sharan N. N., Sevastyanov V. V.

Received nanostructure of the composite film allows to create integrated sensor controls of humidity with high sensitivity, stable in time, with linear dependence of capacity from relative humidity practically in all range of its change (3 to 100%) and keeping working capacity at low temperatures up to -35°C.

Method of determining of crystal part in glass-ceramic dielectric. Dmitriev M. V., Yermichoy I. N., Panov L. I.

This work presents a complex method of estimation of crystal part in composite glass-ceramics at different time points of its sintering, which is based on determining composite's permittivity and free from application of complicated and labourious tool methods of crystal part identification.

Small size digital frequency counters of high-frequency range. Krival I. I., Skrypnuk A. I., Protsenko V. A., Marjenko A. V.

The article presents the review of operation principles, application, brief technical and metrological characteristics of frequency counters as UA ЧЗ-63/3, UA ЧЗ-79М, UA ЧЗ-101.

ПАМЯТКА АВТОРУ ЖУРНАЛА «ТКЭА»

1. Рукопись должна соответствовать тематике журнала и отличаться прикладной направленностью.

Если результаты получены в смежных областях знаний, необходимо показать их применимость в области интересов журнала.

2. При оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- актуальность темы;
- обоснованность постановки задачи;
- новизна информации (в сравнении с работами предшественников);
- убедительность доказательств;
- правомерность выводов;
- возможность практического применения;
- целесообразность (и адекватность тексту) таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;
- строгость терминологии;
- композиция рукописи, в том числе оправданность объема.

3. Название рукописи должно быть конкретным и, в то же время, по возможности кратким.

4. Приведите мини-аннотацию до 20 слов, отображающую важнейший результат статьи.

5. Обозначьте разделы рукописи. Выделите выводы (резюме, заключение). Кстати, проверьте себя — насколько согласуются поставленная задача, выводы и название статьи.

6. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а использованные символы (и аббревиатуры) должны быть пояснены при первом их употреблении в тексте.

7. При ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует (для удобства поиска) указывать не только саму книгу, но и страницу (например [2, с. 418]).

8. Список «Использованные источники» формируется в порядке их упоминания в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (например на материалы конференций) или на недолговечные (например Интернет). Принятое в журнале описание источников показано на сайте www.tkea.com.ua.

9. Сопроводите рукопись библиографической карточкой на русском и английском языках с аннотацией до 500 печ. знаков. Укажите ключевые слова, а также индекс рукописи по Универсальной десятичной классификации (УДК).

10. Материалы статьи направляйте по e-mail <tkea@optima.com.ua> (размер письма не должен превышать 1 Мб). Если Вы направляете рукопись по почте, приложите запись статьи на CD.

Текст статьи набирается в текстовом редакторе Microsoft Word размером 12, без переносов, с интервалом не менее 1,5. Все слова внутри абзаца разделяются только одним пробелом. Правый край текста выравнивать не обязательно. Использование программы Equation допускается только в случаях, когда Word бессилен.

Желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% общего объема статьи. Иллюстрации должны быть представлены отдельными файлами. Графики и чертежи следует выполнять в черно-белом (битовом) режиме.

Если рисунки выполнялись в программе CorelDraw или Word, то необходимо представить оригинальные файлы (*.cdr или *.doc). Рисунки, созданные в других программных пакетах, необходимо экспортировать в любой из следующих форматов: PCX, JPG, TIF.

В случае когда автор не может обеспечить высокое качество рисунка в машинном виде, допускается его выполнение вручную с дальнейшим сканированием в битовом режиме с разрешением 300 ppi.

При подготовке цветных иллюстраций желательно фотографировать объекты на однотонном фоне цифровой камерой. Если проводится сканирование изображений, то его необходимо выполнять с разрешением 300 ppi.

11. Снабдите рукопись сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, должностное положение, дата рождения, служебный и домашний адреса с указанием почтового индекса, e-mail, телефон, телефакс).

12. Если считаете необходимым, сопроводите статью экспертным заключением о возможности ее публикации в открытой печати.

VI СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
НАНОИНДУСТРИИ
NTMEX09

декабрь 2009 года

Здание Правительства Москвы
Универсальный выставочный зал
Москва, Новый Арбат, 36/9

Организатор

ООО «Компания МКМ ПРОФ»

При поддержке

Департамента науки и промышленной
политики города Москвы

Московского комитета
по науке и технологиям

Дирекция

Тел./факс: (495) 502-19-38,
(499) 788-2140, 788-2141, 788-2142
E-mail: mkmprof@mail.ru

www.ntmex.ru

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ
РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ**

Технологии и оборудование
для производства наноматериалов

Наноматериалы и нанотехнологии

Услуги в области нанотехнологии

Модули и оригинальные компоненты
на основе наноматериалов

Наноматериалы для компонентов
и микросистем

Применение нанотехнологий
в областях городского хозяйства

Нанотехнологии в фармацевтике

Продукция с использованием
нанотехнологий и наноматериалов

*Номер готовили
Арзамас, Винница, Днепрпетровск,
Ивано-Франковск, Киев, Львов, Минск,
Москва, Одесса, Саратов, Ташкент,
Черновцы, Ялта.*



Пишите
Подписывайтесь
Читайте