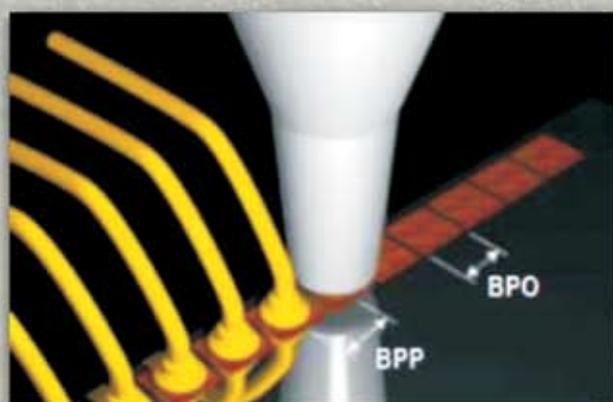
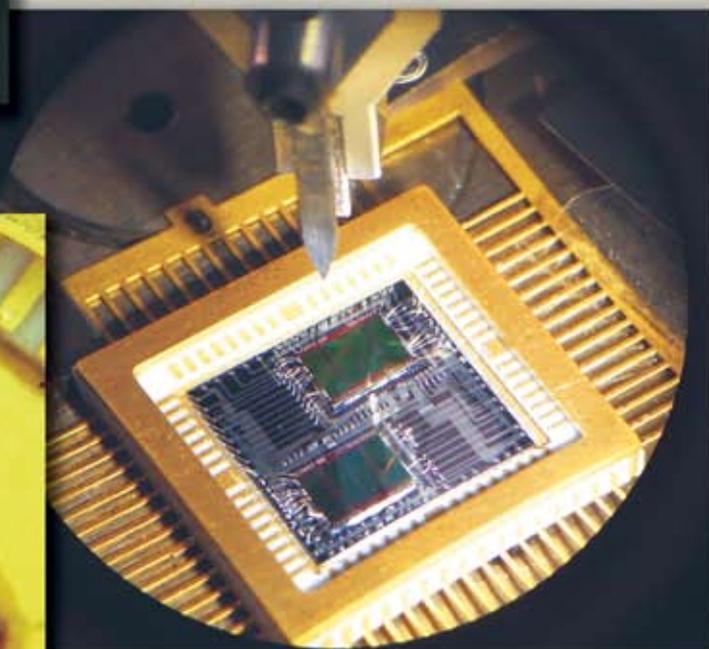
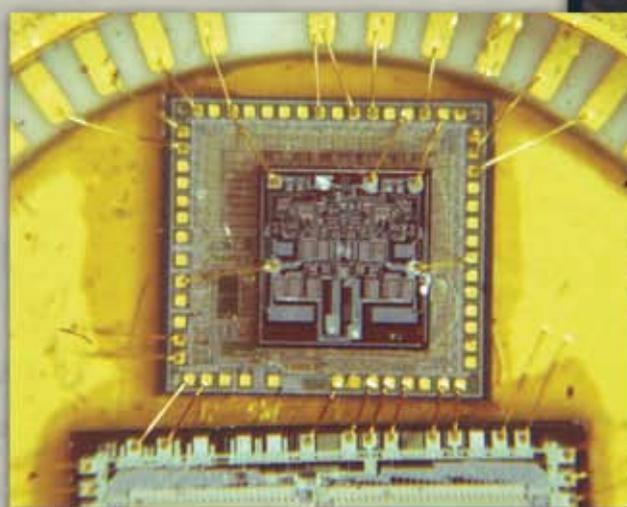


ТРА

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



К статье «Получение соединений повышенной плотности термовзвучной микросваркой в 3D интегральных микросхемах»



2-3 2014

МАРТ — ИЮНЬ



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

Login Skype: politehperiodika, тел. +38 (048)728-18-50, тел./факс 728-49-46

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

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

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

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

Включен в базы данных Ulrich's Periodicals Directory, CrossRef, DOAJ и наукометрическую базу РИНЦ

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 23785.
- В редакции «ТКЭА»** можно подписаться с любого номера.

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

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

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

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 23.06 2014. Формат 60x84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 8,5+1,0. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 220 экз. Заказ № 107.

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

Отпечатано в типографии РА «ART-V»
(65026, г. Одесса, ул. Гаванная, 3).



Номер выпущен при поддержке
НПП «Сатурн», (г. Киев)
ЧАО «Укрналит» (г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

УЧРЕДИТЕЛИ

МПП 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 № 7 от 25.03 2014 г.)
Отв. за выпуск: Тихонова Е. А.

СОДЕРЖАНИЕ

Электронные средства: исследования, разработки	
Классификация методов измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов. <i>Ермоленко Е. А.</i>	3
Экспресс-метод оценки изменений температуры элементов РЭА. <i>Оборский Г. А., Савельева О. С., Шихирева Ю. В.</i>	12
СВЧ-техника	
Использование щелевых резонаторов для проектирования усилителя мощности с манипуляцией гармоник. <i>Рассохина Ю. В., Крыжановский В. Г., Коваленко В. А., Colantonio P., Giofrè R.</i>	18
Двухканальный переключатель СВЧ-мощности на основе электрически активных полупроводниковых структур. <i>Лаврич Ю. Н., Плаксин С. В., Крысь В. Я., Погорелая Л. М., Соколовский И. И.</i>	24
Системы передачи и обработки сигналов	
Система передачи данных с шифрованием хаотическими последовательностями. <i>Политанский Р. Л., Шпатарь П. М., Гресь А. В., Верига А. Д.</i>	28
Энергетическая электроника	
Схемотехника источников питания для импульсно-дуговой сварки с хаотическими колебаниями тока. <i>Сидорец В. Н., Бушма А. И., Жерносеков А. М.</i>	33
Обеспечение тепловых режимов	
Коаксиальная тепловая труба для охлаждения отражателя лазера. <i>Гершуни А. Н., Нищик А. П.</i>	37
Физическое представление и расчет начала кипения в пульсационной тепловой трубе. <i>Наумова А. Н., Кравец В. Ю., Николаенко Ю. Е.</i>	42
Технологические процессы и оборудование	
Получение соединений повышенной плотности термозвуковой микросваркой в 3D интегральных микросхемах. <i>Ланин В. Л., Петухов И. Б.</i>	48
Материалы электроники	
Физические свойства и зонная структура кристаллов $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, легированных марганцем. <i>Марьянчук П. Д., Дымко Л. Н., Романишин Т. Р., Ковалюк Т. Т., Брус В. В., Солован М. Н., Мостовой А. И.</i>	54
Формирование резких границ раздела в эпитаксиальных структурах $p^+-\text{AlGaAs}/n\text{-GaAs}$ методом МОС-гидридной эпитаксии. <i>Вакив Н. М., Круковский С. И., Ларкин С. Ю., Авксентьев А. Ю., Круковский Р. С.</i>	61
Список рецензентов номера	66
Памятка автору журнала «ТКЭА»	67
Новые книги	11, 36, 47, 53
Выставки. Конференции	17

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Класифікація методів вимірювання вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів. *Єрмоленко Є. О.* (3)

Експрес-метод оцінки змін температури елементів РЕА. *Оборський Г. О., Савельєва О. С., Шухірева Ю. В.* (12)

НВЧ-електроніка

Використання щілинних резонаторів для проектування підсилювача потужності із маніпуляцією гармонік. *Рассохіна Ю. В., Крижановський В. Г., Коваленко В. О., Colantonio P., Giofrè R.* (18)

Двоканальний перемикач НВЧ-потужності на основі електрично активних напівпровідникових структур. *Лаврич Ю. М., Плаксін С. В., Кризь В. Я., Погоріла Л. М., Соколовський І. І.* (24)

Системи передачі та обробки сигналів

Система передавання даних з шифруванням хаотичними послідовностями. *Політанський Р. Л., Шпатар П. М., Гресь О. В., Верига А. Д.* (28)

Енергетична електроніка

Схемотехніка джерел живлення для імпульсно-дугового зварювання з хаотичними коливаннями струму. *Сидорець В. М., Бушма О. І., Жерносеков А. М.* (33)

Забезпечення теплових режимів

Коаксіальна теплова труба для охолодження відбивача лазера. *Гершуні О. Н., Ніщук О. П.* (37)

Фізичне уявлення та розрахунок початку кипіння в пульсаційній тепловій трубі. *Наумова А. М., Кравець В. Ю., Ніколаєнко Ю. Є.* (42)

Технологічні процеси та обладнання

Отримання з'єднань підвищеної щільності термозвуковим мікрозварюванням у 3D інтегральних мікросхемах. *Ланін В. Л., Петухов І. Б.* (48)

Матеріали електроніки

Фізичні властивості і зонна структура кристалів $(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, легованих марганцем. *Мар'янчук П. Д., Димко Л. М., Романішин Т. Р., Ковалюк Т. Т., Брус В. В., Солован М. М., Мостовий А. І.* (54)

Формування різких меж розділу в епітаксійних структурах $p^+-\text{AlGaAs}/n\text{-GaAs}$ методом МОС-гідридної епітаксії. *Ваків М. М., Круковський С. І., Ларкін С. Ю., Авксент'єв А. Ю., Круковський Р. С.* (61)

CONTENTS

Electronic means: investigations, development

Classification of methods for measuring current-voltage characteristics of semiconductor devices. *Iermolenko Ie. A.* (3)

Rapid method to estimate temperature changes in electronics elements. *Oborskii G. A., Savel'eva O. S., Shikhireva Yu. V.* (12)

Microwave engineering

Inverse class-F power amplifier using slot resonators as a harmonic filter. *Rassokhina Yu. V., Krizhanovski V. G., Kovalenko V. A., Colantonio P., Giofrè R.* (18)

Two-channel microwave power switch construction on the basis of electrically active semiconductor structures. *Lavrish Yu. N., Plaksin S. V., Kris V. Ya., Pogorelaya L. M., Sokolovskiy I. I.* (24)

Signals transfer and processing systems

Data transmission system with encryption by chaotic sequences. *Politans'kiy R. L., Shpatar P. M., Hres A. V., Verigha A. D.* (28)

Power electronics

Circuitry of power supplies for pulsed arc welding with chaotic current oscillations. *Sidorets V. N., Bushma A. I., Zhernosekov A. M.* (33)

Thermal management

Coaxial heat pipe for cooling of a laser's reflector. *Gershuni A. N., Nishchik A. P.* (37)

Physical concept and calculation of boiling point in a pulsating heat pipe. *Naumova A. N., Kravets V. Yu., Nikolaenko Yu. E.* (42)

Production technology and equipment

Obtaining raised density connections by thermosonic microwelding in 3D integrated microcircuits. *Lanin V. L., Petuhov I. B.* (48)

Materials of electronics

Physical properties and band structure of crystals $(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, doped with manganese. *Maryanchuk P. D., Dymko L. N., Romanishyn T. R., Kovalyuk T. T., Brus V. V., Solovan M. N., Mostovoy A. I.* (54)

Sharp interfaces in $p^+-\text{AlGaAs}/n\text{-GaAs}$ epitaxial structures obtained by MOCVD. *Vakiv N. M., Krukovskii S. I., Larkin S. Yu., Avksent'ev A. Yu., Krukovskii R. S.* (61)

Е. А. ЕРМОЛЕНКО

Украина, г. Алчевск, Донбасский государственный технический университет
E-mail: ermolenkoea@gmail.com

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Проведены анализ и обобщение методов измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых приборов. Выделены их основные классификационные признаки и составлена классификация, с использованием которой определены наиболее эффективные методы измерения ВАХ с точки зрения сформулированных в работе критериев (длительность процесса измерения и степень его автоматизации, а также интенсивность саморазогрева полупроводниковых структур при измерениях).

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, полупроводниковый прибор, метод измерения, классификация.

На сегодняшний день полупроводниковые приборы (ПП) получили широкое распространение и применяются практически во всех отраслях техники. Качество, себестоимость и надежность работы ПП зависят от технологического процесса их производства. Одним из наиболее важных этапов этого техпроцесса является контроль качества, который заключается в проверке электрических параметров каждого ПП на соответствие техническим условиям. Контроль качества осуществляется специализированными компьютерными системами, входящими в состав зондовых станций, путем измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) каждого ПП непосредственно на кремниевой пластине. При этом в число наиболее важных критериев эффективности таких компьютерных систем входят длительность процесса измерения, интенсивность саморазогрева ПП и степень автоматизации процесса измерения.

Следует отметить, что компьютерные системы измерения ВАХ используются не только на производстве, но и для других задач, например для подбора дискретных полупроводниковых приборов с максимально близкими параметрами, где эффективность процесса измерения не менее важна.

В работах известных специалистов по данной тематике показано, что с точки зрения перечисленных критериев эффективность компьютерных систем измерения ВАХ зависит не только от их аппаратных средств, но и от методов измерения [1–5]. При этом отсутствуют работы, в которых были бы обобщены сведения о существующих методах измерения ВАХ или четко выделены признаки, на основе которых можно их классифицировать, и это затрудняет выбор метода измерения ВАХ для достижения максимальной эффективности процесса измерения.

Целью настоящей работы является анализ и обобщение существующих методов измерения ВАХ ПП и их классификация с последующим выявлением наиболее эффективных решений с точки зрения перечисленных выше критериев.

Авторы зарубежных публикаций часто придерживаются следующей классификации методов измерения ВАХ [1, 6–10]:

- статические (или непрерывные) методы (static measurements, DC-measurements);
- динамические (или импульсные) методы (dynamic IV measurements, pulsed IV measurements).

Статические методы измерения ВАХ предусматривают подачу на исследуемый ПП электрических измерительных воздействий*, непрерывно изменяющихся во времени. Динамические методы предусматривают подачу на исследуемый ПП коротких импульсов, во время действия которых измеряется отклик прибора. Однако подобной классификации не поддается метод, при котором на один из выводов трехэлектродного ПП подается непрерывный сигнал, а на другой – импульсный (например, при снятии серии выходных ВАХ транзистора [4, 11]).

Кроме того, среди работ по данной тематике существует неоднозначность в определении импульсного метода. Например, в [1, 5–7] импульсным считается метод, когда при измерении ВАХ задается постоянный режим покоя ПП (с т. н. точкой покоя, в зарубежной литературе – «quiescent point», «Q-point» или «bias point»), в котором находится прибор в моменты отсут-

* Здесь и далее под измерительным воздействием будем понимать электрический сигнал (напряжение или ток) амплитудой A , который подается на тестируемый ПП с целью измерения его отклика.

ствия измерительных воздействий. В этом случае воздействующий сигнал имеет форму импульсов и одновременно является непрерывным во времени.

Таким образом, к недостаткам рассмотренной классификации можно отнести отсутствие четких критериев, по которым можно определить принадлежность метода к тому или иному виду. Кроме того, классификация методов измерения ВАХ только по форме измерительных воздействий не дает информации о других важных аспектах, таких как состояние ПП во время измерения, средства, с помощью которых может осуществляться тот или иной метод, и др.

Существуют также публикации, где в зависимости от состояния ПП во время измерений ВАХ выделяют изотермические и изодинамические методы [1, 2, 5, 6].

Изотермическими называют измерения, при которых температура ПП поддерживается приблизительно на одинаковом уровне. Основная их цель — предотвращение непрерывного роста температуры ПП вследствие саморазогрева, что способствует уменьшению тепловых искажений ВАХ и может существенно увеличить точность результатов. Как правило, изотермические измерения ВАХ осуществляются при применении импульсных методов [1, 2].

Изодинамические измерения проводятся таким образом, чтобы заряд, обусловленный эффектом захвата носителей на паразитных энергетических уровнях ПП, в процессе измерения ВАХ оставался неизменным. Основная цель изодинамических измерений — повышение точности измерения ВАХ путем предотвращения или стабилизации эффекта захвата носителей [1, 4–7, 10, 12, 13]. Как правило, изодинамическое со-

стояние ПП в процессе измерения его ВАХ поддерживается благодаря использованию импульсных методов с применением очень малых длительностей импульсов (200 нс — 2 мкс) [1, 5, 6].

Среди отечественных публикаций наиболее полной является классификация методов измерения ВАХ, приведенная в [7]: в зависимости от инерционности измерительных средств, а также скорости и характера изменения подаваемых воздействий методы измерения ВАХ разделяются на статические, динамические и квазистатические, осуществляемые вручную или автоматически. К недостаткам такой классификации можно отнести неоднозначность определений каждого метода измерения ВАХ и отсутствие объективных критериев, по которым можно было бы однозначно идентифицировать тот или иной метод.

Таким образом, анализ зарубежных и отечественных публикаций показал, что существует множество различных, отличающихся между собой по ряду признаков, методов измерения ВАХ ПП:

- статические [6, 14–16];
- динамические [1, 4, 6–9, 11, 14, 17–19];
- методы, ориентированные на измерение ВАХ двух- или трехэлектродных ПП [11, 16, 20];
- специализированные методы для ПП, ВАХ которых имеет участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением [21, 22];
- методы с учетом либо контролем теплового состояния ПП во время измерения [1, 2, 23];
- методы с использованием математических вычислений или статистической обработки результатов измерения для получения характеристики [6, 23–25];
- различные автоматизированные методы, для реализации которых требуется специали-

Классификационные признаки

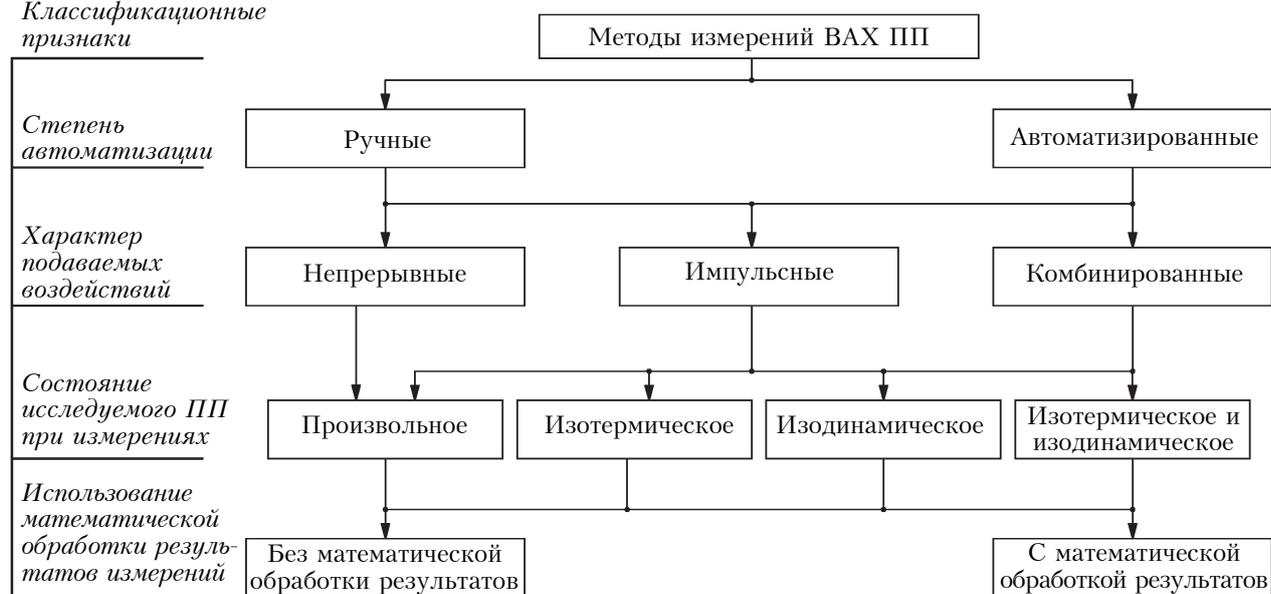


Рис. 1. Классификация методов измерения ВАХ ПП

зированное оборудование [8, 9, 14, 16, 18–20, 24, 26, 27 и др.].

Проведенный анализ позволил выделить основные классификационные признаки и составить классификационную схему методов измерения ВАХ, показанную на рис. 1.

Классификация по степени автоматизации

Поскольку все методы измерения ВАХ основываются на измерении токов и напряжений, наиболее общим классификационным признаком можно назвать степень их автоматизации. В соответствии с этим признаком все методы измерения ВАХ можно разделить на ручные и автоматизированные. Подобное разделение характеризует не только долю участия человека в измерительном процессе, но и средства, с помощью которых могут проводиться измерения ВАХ.

Ручные методы измерения ВАХ предполагают, прежде всего, ручное управление источниками измерительных сигналов, а также ручную регистрацию откликов исследуемого ПП, и могут отличаться между собой характером подаваемых воздействий. Ручные методы наименее эффективны с точки зрения саморазогрева ПП и длительности процесса измерений.

В *автоматизированных методах* измерения ВАХ выполнение некоторых трудоемких операций (таких как подача измерительных воздействий, регистрация откликов ПП и пр.) осуществляется автоматически с помощью специальных аппаратных средств. В качестве аппаратных средств, позволяющих автоматизировать процесс измерения ВАХ, могут использоваться различные приборы и устройства. Такими устройствами могут быть осциллографы, различные приставки, позволяющие расширять их функциональные возможности (например, выводить на экран осциллографа серии ВАХ трехэлектродных ПП) [16, 24, 28], а также специализированные компьютерные системы, в которых управление процессом измерения ВАХ и обработку зарегистрированных данных осуществляет микроконтроллер или персональный компьютер [29]. Применение микропроцессорной техники позволяет разносторонне обрабатывать данные, полученные в процессе измерений, не подвергая прибор непрерывным электрическим воздействиям. Благодаря программно-управляемым аппаратным средствам такие измерительные системы, как правило, характеризуются высоким быстродействием и точностью.

Автоматизированные методы реализуются различными измерительными системами, возможности которых ограничены только возможностями элементной базы их аппаратных средств. Однако эффективность этих систем в значительной мере зависит от характера измерительных воздействий, подаваемых на ПП в процессе измерения ВАХ. Поэтому вторым и наиболее важным классификационным признаком является характер подаваемых воздействий, по которому все

методы измерения ВАХ ПП можно разделить на непрерывные, импульсные и комбинированные.

Классификация по характеру подаваемых измерительных воздействий

Непрерывные методы: при измерении ВАХ на ПП последовательно подаются непрерывные во времени измерительные воздействия с постепенно изменяющейся амплитудой. В зависимости от типа тестируемого ПП и используемых средств измерения ВАХ форма таких воздействий может отличаться.

Наиболее часто среди непрерывных методов измерения ВАХ применяется метод со ступенчато изменяющейся амплитудой измерительных воздействий (рис. 2, а, б) [6, 14, 15]. При этом, как правило, используются цифровые аппаратные средства, а измерения ВАХ могут реализовываться различными компьютерными системами [30–32].

Следует отметить, что существуют модификации такого метода измерения ВАХ, адаптированные для определенных типов ПП. Так, например, в [21] описывается метод измерения нелинейной ВАХ ПП с участками отрицательного дифференциального сопротивления (например, тиристоров). Для перехода таких ПП в проводящее состояние необходим импульс включения. Соответственно, при измерении ВАХ непрерывным методом этот импульс должен предшествовать измерительным воздействиям (рис. 2, в) [21].

Еще одним примером непрерывных методов измерения ВАХ является так называемый осциллографический метод, когда в качестве источника измерительных воздействий используется аналоговый генератор или специальные приставки к осциллографам для снятия серий характеристик [24]. В этом случае характер измерительных воздействий может иметь пилообразную или синусоидальную форму (рис. 2, г).

Основной недостаток непрерывных методов измерения ВАХ заключается в том, что в процессе измерения через исследуемый ПП постоянно

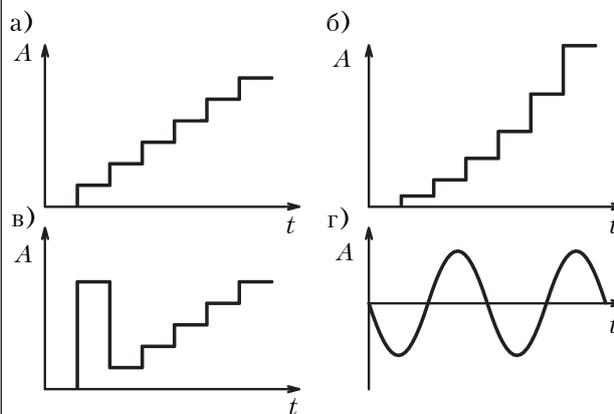


Рис. 2. Формы измерительных воздействий, прикладываемых к ПП в соответствии с непрерывными методами измерения ВАХ

протекает ток, причем амплитуда его может все время увеличиваться. Это приводит к накоплению тепла в структуре тестируемого прибора, что вызывает искажение ВАХ и возникновение методической погрешности. Данная погрешность наиболее сильно будет выражена при тестировании силовых приборов, а также при многократном измерении характеристик одного и того же ПП (например, при снятии серий ВАХ транзистора). Нагрев полупроводниковой структуры приводит не только к искажению ВАХ, но и к ограничению возможного диапазона измерения. Помимо этого, при использовании непрерывных методов измерения ВАХ наиболее сильно выражено влияние эффекта захвата носителей тока на результаты измерений [1, 4, 6, 7, 10, 12].

Импульсные методы: при измерении ВАХ на ПП подается последовательность измерительных импульсов различной амплитуды, в паузах между которыми электрические воздействия на ПП отсутствуют. Точки ВАХ определяются путем регистрации отклика тестируемого ПП во время действия каждого импульса. В связи с тем, что ток через исследуемый прибор протекает только в моменты действия измерительных импульсов, снижается по сравнению с непрерывными методами и общий нагрев прибора, и влияние эффекта захвата носителей в ПП [1, 4–7]. В зависимости от типа тестируемого ПП и используемых средств измерения ВАХ, форма импульсных измерительных воздействий может быть различной.

Среди существующих импульсных методов измерения ВАХ наиболее распространенным является метод, согласно которому на ПП подается последовательность прямоугольных измерительных импульсов с возрастающей амплитудой (рис. 3, а) [1, 8, 11, 14, 17, 18, 21]. При этом длительность импульсов и длительность пауз между ними в процессе измерения ВАХ остаются постоянными. При измерении ВАХ трехэлектродного ПП такой метод предусматривает по-

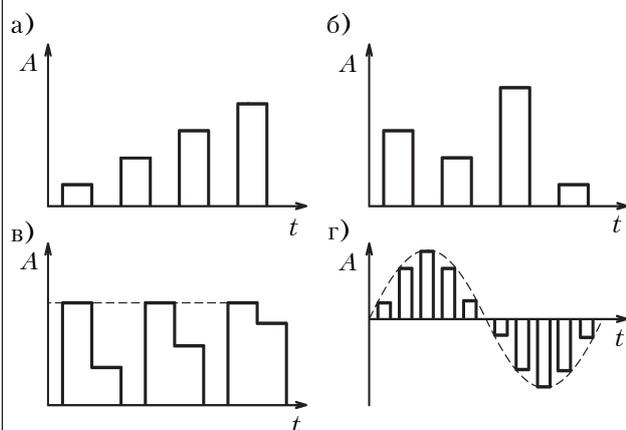


Рис. 3. Формы измерительных воздействий, прикладываемых к ПП в соответствии с импульсными методами измерения ВАХ

дачу импульсных воздействий как на его входные цепи, так и на выходные.

Модификацией описанного метода является метод, согласно которому амплитуда воздействующих импульсов в процессе измерения ВАХ варьируется в случайном порядке в пределах заданного пользователем диапазона (рис. 3, б). Такой метод используется для экспериментального подбора параметров импульсных воздействий [1].

Импульсные методы, как и непрерывные, используются при тестировании ПП, ВАХ которых имеет участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В этом случае каждому измерительному импульсу предшествует отпирающий импульс большей амплитуды (рис. 3, в) [21].

Импульсный метод измерения также находит свое применение в специализированных приставках, позволяющих измерять и наблюдать на экране осциллографа серии ВАХ, полученные с применением импульсной модуляции пилообразного или синусоидального воздействующего сигнала генератора (рис. 3, г) [19].

Импульсные методы измерения ВАХ широко распространены и реализовываются, как правило, компьютерными системами. Разные системы измерения позволяют формировать импульсные последовательности с различной длительностью импульсов и пауз между ними (от нескольких сотен наносекунд до единиц миллисекунд). Однако среди зарубежных и отечественных публикаций достаточно сложно найти работы, в которых давались бы однозначные и непротиворечивые рекомендации по выбору параметров импульсной последовательности для наиболее эффективного измерения ВАХ. Поскольку различные ПП обладают различными физическими свойствами, параметры импульсной последовательности, приемлемые для одних ПП, могут быть неэффективными для других. Например, при измерении ВАХ быстродействующего прибора выбранная длительность импульса может быть избыточной, что приведет к излишнему самонагреву ПП. Помимо длительности импульса эффективность процесса измерения ВАХ импульсным методом также зависит от длительности паузы, поскольку она оказывает непосредственное влияние на длительность всего процесса измерения и на величину самонагрева ПП. Так, в зависимости от тепловых свойств тестируемого ПП выбранная длительность пауз между воздействующими импульсами может оказаться недостаточной для полного остывания полупроводникового кристалла к моменту прихода следующего импульса, что приведет к накоплению тепла в структуре ПП [33–35].

Таким образом, с точки зрения снижения самонагрева ПП и уменьшения интенсивности захвата носителей импульсные методы позволяют осуществлять измерение ВАХ более эффек-

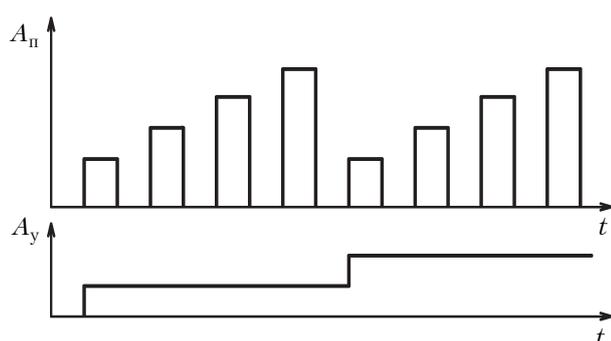


Рис. 4. Форма измерительных воздействий для снятия серий выходных характеристик транзистора комбинированным методом

тивно, чем непрерывные, в особенности при использовании быстродействующих компьютеризированных измерительных систем.

На решение задачи выбора длительности импульсов и длительности пауз между ними направлен адаптивный метод измерения ВАХ, предложенный в [36] и позволяющий автоматически выбирать их величину исходя из индивидуальных свойств тестируемого ПП. Адаптивный метод позволяет сократить длительность измерений и уменьшить саморазогрев ПП.

Комбинированные методы: при измерении ВАХ на ПП подается последовательность измерительных импульсов различной амплитуды, причем подаваемый хотя бы на один из электродов сигнал непрерывен во времени. Одним из примеров использования комбинированных методов является измерение ВАХ трехэлектродного ПП, представляющей собой функцию двух параметров, один из которых варьируется, а второй остается постоянным. Например, при снятии серии выходных характеристик транзистора питающие воздействия A_n в выходной цепи транзистора могут представлять собой импульсы с варьируемой амплитудой, а постоянное управляющее воздействие A_y во входной цепи — не-

прерывный сигнал (рис. 4). Такие комбинированные методы описаны в [4, 11, 37].

Еще одним примером комбинированных методов измерения ВАХ являются вышеупомянутые методы с точкой покоя Q-point [1, 5–7], относительно которой при измерении ВАХ формируется амплитуда измерительных импульсов. Таким образом, электрический сигнал, воздействующий на ПП, является непрерывным во времени и в то же время носит импульсный характер (рис. 5, а). При измерении таким методом ВАХ трехэлектродных ПП (например, выходных характеристик транзистора) форма питающих воздействий A_n в выходной цепи транзистора может быть непрерывной, а управляющих воздействий A_y во входной цепи — импульсной (рис. 5, б) [9].

Необходимость в таких методах измерения обусловлена влиянием на характеристики ПП эффекта захвата носителей тока. Степень этого влияния пропорциональна величине постоянного электрического сигнала, воздействующего на ПП, поэтому характеристики одного и того же ПП в различных режимах его работы могут отличаться [1, 5, 10]. Соответственно, ВАХ, измеренная при одном режиме работы ПП, может недостаточно точно характеризовать его работу в другом режиме в составе какого-либо устройства. Эта особенность может быть важна при подборе ПП для усилительных каскадов, предусматривающих его работу в заданном активном режиме. Поэтому для получения ВАХ, максимально точно характеризующей тот режим работы ПП, в котором он будет работать в конечном устройстве, используют комбинированные методы измерения с точкой покоя. В этом случае постоянное смещающее воздействие Q-point позволяет поддерживать интенсивность захвата носителей в структуре ПП на заданном уровне, а короткие измерительные импульсы — достичь меньшего саморазогрева ПП по сравнению с непрерывными методами. Измерения ВАХ такими методами используются также для количественной оценки интенсивно-

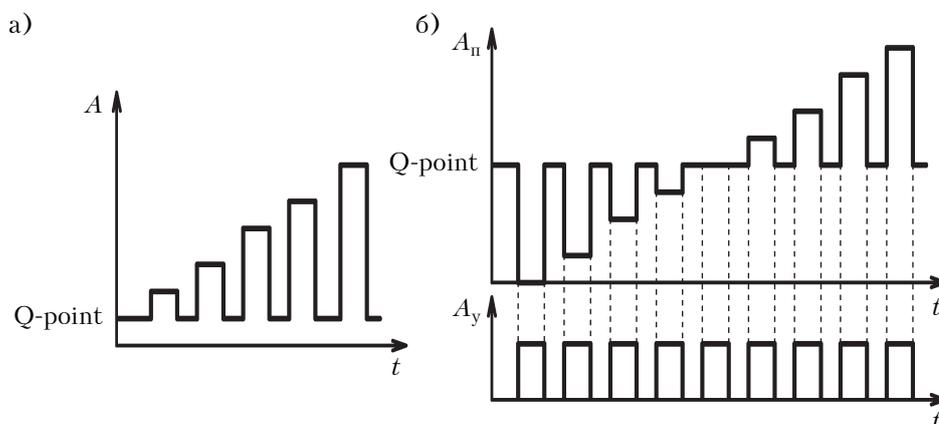


Рис. 5. Форма электрических сигналов, воздействующих на двухэлектродный (а) и трехэлектродный (б) ПП при измерении ВАХ комбинированным методом с точкой покоя

сти захвата носителей в ПП по величине отклонения измеренных характеристик [1, 4, 5, 12].

Таким образом, с точки зрения влияния на саморазогрев исследуемого ПП комбинированные методы измерения ВАХ занимают промежуточное место между непрерывными и импульсными, поскольку процесс измерения осуществляется при температуре, определяемой величиной постоянной составляющей воздействующего сигнала. Подобно импульсным, эффективность комбинированных методов измерения существенно зависит от выбора параметров измерительной импульсной последовательности, а также степени их соответствия индивидуальным свойствам исследуемого ПП.

Классификация по состоянию исследуемого прибора во время измерений

Немаловажным классификационным признаком, характеризующим влияние дестабилизирующих факторов, является то, в каком состоянии находится исследуемый ПП во время измерения ВАХ: в произвольном, изотермическом, изодинамическом или одновременно в изотермическом и изодинамическом состоянии.

Методы с произвольным состоянием ПП: в процессе измерения ВАХ не предотвращается ни саморазогрев тестируемого прибора, ни захват носителей тока в его структуре. К таким методам относятся непрерывные методы измерения ВАХ, а также импульсные и комбинированные методы в тех случаях, когда параметры формируемой измерительной импульсной последовательности задаются без учета инерционных и тепловых свойств тестируемого ПП. Такие несоответствия могут приводить как к саморазогреву ПП, так и к захвату носителей тока.

Методы с изотермическим состоянием ПП: при измерении ВАХ температура ПП остается приблизительно на одном и том же уровне благодаря использованию коротких импульсных измерительных воздействий. Очевидно, что изотермическое состояние ПП могут обеспечить только импульсные и комбинированные методы измерения ВАХ при условии правильного выбора параметров измерительной импульсной последовательности и использовании быстродействующих измерительных систем для их реализации.

Методы с изодинамическим состоянием ПП: при измерении ВАХ заряд, накапливаемый в его структуре в результате захвата носителей, остается неизменным. Как и изотермическое, изодинамическое состояние ПП достигается путем использования коротких воздействующих импульсов и может реализовываться только импульсными и комбинированными методами. В зависимости от выбора параметров этих воздействий импульсные методы допускают возможность предотвращения захвата носителей тока, в то время как комбинированные методы позволяют лишь поддерживать его интенсивность на заданном уровне.

Методы, предусматривающие одновременно и изотермическое, и изодинамическое состояние ПП в процессе измерения ВАХ, соответственно, предполагают постоянство как температуры, так и захвата носителей тока в его структуре, и являются наиболее эффективными.

Классификация по использованию математической обработки результатов измерений

Среди всех методов измерения ВАХ, независимо от характера подаваемых воздействий или состояния ПП, можно выделить методы с математической обработкой результатов измерений и без таковой. Под математической обработкой понимается осуществление любых математических операций над результатами измерений с целью получения ВАХ. Как правило, такие вычисления представляют собой либо математическую коррекцию измеренных величин, либо статистическую обработку результатов измерения.

Например, в [6] описывается комбинированный метод измерения ВАХ, согласно которому для получения каждой точки ВАХ на ПП подается несколько одинаковых измерительных воздействий, измеряются отклики прибора на них, после чего вычисляется среднее значение измеренных величин. В [23] описывается метод математической коррекции ВАХ транзистора, подверженной искажениям вследствие его саморазогрева. Также известны методы, предусматривающие получение ВАХ двухэлектродного ПП путем ее математического вычисления по измеренным параметрам [25].

Достоинство методов с математической обработкой результатов измерений заключается в том, что применение математического аппарата в некоторых случаях позволяет компенсировать погрешности измерений и повысить достоверность результатов без использования дорогостоящих прецизионных аппаратных средств. Как правило, такие методы измерения ВАХ реализовываются с применением компьютеризированных измерительных систем.

Выводы

Согласно предложенной классификационной схеме, методы измерения ВАХ полупроводниковых приборов можно классифицировать по степени автоматизации, характеру подаваемых воздействий, по состоянию исследуемого ПП во время измерений и по использованию математической обработки результатов измерений.

В результате анализа существующих методов измерения ВАХ ПП установлено, что с точки зрения таких критериев, как длительность процесса измерения и степень его автоматизации, а также интенсивность саморазогрева ПП при измерениях, наиболее эффективными являются автоматизированные импульсные методы, при которых ПП находится в изотермическом и изодинамическом состоянии. Такие методы, как

правило, реализовываются быстродействующими компьютерными системами измерения ВАХ с осуществлением математической обработки результатов измерений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Parker A., Rathmell J., Scott J. Pulsed measurements. — Boca Raton: CRC Press, Inc., 2003.
2. Parker A., Scott J., Rathmell J., Sayed M. Determining timing for isothermal pulsed-bias S-parameter measurements // IEEE MTT-S International Symposium Digest. — USA, San Francisco. — 1996. — P. 1707–1710.
3. Seok J., Roblin P., Sunyoung L. Pulsed-IV pulsed-RF measurements using a large signal network analyzer // ARFTG Conference Digest 65th. — USA, Cincinnati. — 2005. — P. 26–32. DOI: 10.1109/ARFTGS.2005.1500578
4. Rathmell J., Parker A. Characterizing charge trapping in microwave transistors // SPIE Proceedings. Vol. 6035: Microelectronics: Design, Technology, and Packaging II. — 2006. — 9 p. DOI: 10.1117/12.638348
5. Scott J., Rathmell J., Parker A., Sayed M. Pulsed device measurements and applications // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 1996. — Vol. 44, N 12. — P. 2718–2723.
6. Baylis C., Dunleavy L. Performing and analyzing pulsed current-voltage measurements // High Frequency Electronics. — 2004. — Vol. 3, N 5. — P. 64–69.
7. Hulbert P. Dual channel pulse testing simplifies RF transistor characterization // Keithley whitepaper. — 2008. — Vol. 9. — P. 1–5.
8. Pat. 7616014 USA. Pulsed I-V measurement method and apparatus / Gregory Sobolewski. — 10.11.2009.
9. Pat. 7280929 USA. Method and apparatus for pulse I-V semiconductor measurements / Yuegang Zhao. — 09.10.2007.
10. Harris H., Laskar J., Nuttinck S. Engineering support for high power density gallium nitride microwave transistors / Georgia Institute of Technology. — Atlanta, 2001.
11. Pat. 7230444 USA. Method for measuring characteristics of FETs / Noboru Saito. — 12.06.2007.
12. Keithley Instruments. Pulsed Characterization of Charge-Trapping Behavior in High k Gate Dielectrics. <http://www.keithley.com/data?asset=50323>. (10.09.2012)
13. Keithley Instruments. Wafer Level Reliability Systems <http://www.keithley.com/data?asset=52574>. (11.09.2012)
14. Глинченко А. С., Егоров Н. М., Комаров В. А., Сарафанов А. В. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий. — Москва: ДМК Пресс, 2008.
15. Pat. 5406217 USA. Method of measuring the current-voltage characteristics of a DUT / Satoshi Habu. — 11.04.1995.
16. Pat. 148037 Poland. Sposób pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych przyrządów pólprzewodnikowych, zwłaszcza tranzystorów / Jerzy Kuchta, Henryk Rzepa. — 15.06.1987.
17. Kaczinsky J., Newman D., Gaggl R. Aspects of high power probing // IEEE Semiconductor Wafer Test Workshop. — USA, San Diego. — 2011.
18. Кудреватых Е. Ф. Виртуальный измеритель вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов АСС-4211 // Контрольно-измерительные приборы и системы. — 2002. — № 1. — С. 17–19.
19. Pat. 1227113 GB. Improvements in or relating to apparatus for measuring and displaying current-voltage characteristics / NEC Limited. — 07.04.1971.
20. А. с. 1095114 СССР. Устройство для исследования вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов / М.А.Лякас, А.Н.Привитень. — 30.05.1984.
21. Pat. 1464968 EU. A method for determining the current-voltage characteristic of snap-back device / Natarajan Mahadeva. — 06.10.2004.
22. Пат. 2024031 России. Устройство для измерения параметров полупроводниковых приборов с S-образной ВАХ / Н.Г. Чернобровин, М.Н. Пиганов. — 30.11.1994.
23. Pat. 8108175 USA. Method for determining self-heating free I-V characteristics of a transistor / Oiang Chen, Zhi-Yuan Wu. — 31.01.2012.
24. Pat. 2896168 USA. Transistor characteristic curve tracers / Donald E. Thomas. — 21.07.1959.
25. А. с. 894613 СССР. Способ определения вольт-амперной характеристики двухполюсника / Кукушкин В.В., Соляков В.Н. — 30.12.1981.
26. Pat. 4456880 USA. I-V curve tracer employing parametric sampling / Warner T., Cox C. — 26.06.1984.
27. Pat. 4467275 USA. DC characteristics measuring system / Koichi Maeda, Haruo Ito. — 21.08.1984.
28. International Rectifier. Application Note AN-957. Measuring HEXFET MOSFET Characteristics <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-957.pdf>. (12.10.2011)
29. Ермоленко Е.А., Бондаренко А.Ф. Компьютерная система для измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов с удаленным доступом // Тр. 14-й МНПК «СИЭТ-2013». Т. I. — Украина, г. Одесса. — 2013. — С. 113–114.
30. Скворцов С. Высокопроизводительные измерительно-питающие устройства компании Кейтли для тестирования электронных компонентов и интегральных схем // Chip-News. — 2005. — № 7. — С. 30–32.
31. Agilent Technologies. E5260A 8 Slot High speed Measurement Mainframe <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-1356EN.pdf>. (19.03.2012)
32. Agilent Technologies. B1530A Waveform Generator Fast Measurement Unit <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8378EN.pdf>. (10.09.2011)
33. Давидов П. Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов. — Москва: Энергия, 1967.
34. Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Недошвин Р. П. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. — Москва: Энергоатомиздат, 1985.
35. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы. — Москва: Энергоатомиздат, 1990.
36. Пат. 96998 України. Спосіб автоматизованого вимірювання вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів. / О. Ф. Бондаренко, Є. О. Ермоленко. — 2011. — Бюл. № 24.
37. Pat. 2004/034071 GB. Semiconductor monitoring instrument / Ladbrooke Peter, Goodship Neil. — 22.04.2004.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 24.12.2013 г.*

Є. О. ЄРМОЛЕНКО

Україна, м. Алчевськ, Донбаський державний технічний університет
E-mail: ermolenkoea@gmail.com

КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

Проведено аналіз та узагальнено методи вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових приладів. Виділено їх основні класифікаційні ознаки та складено класифікацію, з використанням якої визначено найбільш ефективні методи вимірювання ВАХ з точки зору сформульованих в роботі критеріїв (тривалість процесу вимірювання та ступінь його автоматизації, а також інтенсивність саморозігріву напівпровідникових структур при вимірюваннях).

Ключові слова: вольт-амперна характеристика, напівпровідниковий прилад, метод вимірювання, класифікація.

DOI: 10.15222/ТКЕА2014.2-3.03
UDC 621.317: 621.3.08

Ye. O. IERMOLENKO

Ukraine, Alchevsk, Donbas State Technical University
E-mail: ermolenkoea@gmail.com

CLASSIFICATION OF METHODS FOR MEASURING CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES

It is shown that computer systems for measuring current-voltage characteristics are very important for semiconductor devices production. The main criteria of efficiency of such systems are defined. It is shown that efficiency of such systems significantly depends on the methods for measuring current-voltage characteristics of semiconductor devices. The aim of this work is to analyze existing methods for measuring current-voltage characteristics of semiconductor devices and to create the classification of these methods in order to specify the most effective solutions in terms of defined criteria.

To achieve this aim, the most common classifications of methods for measuring current-voltage characteristics of semiconductor devices and their main disadvantages are considered. Automated and manual, continuous, pulse, mixed, isothermal and isodynamic methods for measuring current-voltage characteristics are analyzed. As a result of the analysis and generalization of existing methods the next classification criteria are defined: the level of automation, the form of measurement signals, the condition of semiconductor device during the measurements, and the use of mathematical processing of the measurement results. With the use of these criteria the classification scheme of methods for measuring current-voltage characteristics of semiconductor devices is composed and the most effective methods are specified.

Keywords: current-voltage characteristic, semiconductor device, method of measurement, classification.

REFERENCES

1. Parker A., Rathmell J., Scott J. *Pulsed measurements*, Boca Raton, CRC Press, Inc., 2003.
2. Parker A., Scott J., Rathmell J., Sayed M. Determining timing for isothermal pulsed-bias S-parameter measurements. *IEEE MTT-S International Symposium Digest*, USA, San Francisco, 1996, pp. 1707–1710.
3. Seok J., Roblin P., Sunyoung L. Pulsed-IV pulsed-RF measurements using a large signal network analyzer. *ARFTG Conference Digest 65th*, USA, Cincinnati, 2005, pp. 26–32. DOI: 10.1109/ARFTGS.2005.1500578
4. Rathmell J., Parker A. Characterizing charge trapping in microwave transistors. *SPIE Proceedings*, vol. 6035: Microelectronics: Design, Technology, and Packaging II, 2006, 9 p. DOI: 10.1117/12.638348
5. Scott J., Rathmell J., Parker A., Sayed M. Pulsed device measurements and applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996, vol. 44, no 12, pp. 2718–2723.
6. Baylis C, Dunleavy L. Performing and analyzing pulsed current-voltage measurements. *High Frequency Electronics*, 2004, vol. 3, no 5, pp. 64–69.
7. Hulbert P. Dual channel pulse testing simplifies RF transistor characterization. *Keithley whitepaper*, 2008, vol. 9, pp. 1–5.
8. USA patent 7616014. *Pulsed I-V measurement method and apparatus*, Gregory Sobolewski, 10.11.2009.
9. USA patent 7280929. *Method and apparatus for pulse I-V semiconductor measurements*. Yuegang Zhao, 09.10.2007.
10. Harris H., Laskar J., Nuttinck S. *Engineering support for high power density gallium nitride microwave transistors*. Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2001, 119 p.
11. USA patent 7230444. *Method for measuring characteristics of FETs*, Noboru Saito 12.06.2007.
12. Keithley Instruments. *Pulsed Characterization of Charge-Trapping Behavior in High k Gate Dielectrics*. Available at: <http://www.keithley.com/data?asset=50323>. (10.09.2012)
13. Keithley Instruments. *Wafer Level Reliability Systems*. Available at: <http://www.keithley.com/data?asset=52574>. (11.09.2012)
14. Glinchenko A. S., Egorov N. M., Komarov V. A., Sarafanov A. V. *Issledovanie parametrov i kharakteristik*

poluprovodnikovykh priborov s primeneniem internet-tehnologii [Research of parameters and characteristics of semiconductor devices with the use of Internet technologies] Moscow, DMK Press, 2008, 352 p. (in Russian)

15. USA patent 5406217. *Method of measuring the current-voltage characteristics of a DUT*. Satoshi Habu, 11.04.1995.

16. Poland patent 148037. *Sposyb pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych przyrządów pylprzewodnikowych, zwłaszcza tranzystorów*, Jerzy Kuchta, Henryk Rzepa 15.06.1987.

17. Kaczinsky J., Newman D., Gaggl R. Aspects of high power probing. *IEEE Semiconductor Wafer Test Workshop*, USA, San Diego, 2011.

18. Kudrevatykh E. F. [Virtual meter ACC-4211 for measurement of current-voltage characteristics of semiconductor devices] *Kontrol'no-izmeritel'nye pribory i sistemy*, 2002, no 1, pp. 17–19 (in Russian)

19. GB patent 1227113. *Improvements in or relating to apparatus for measuring and displaying current-voltage characteristics*, NEC Limited, 07.04.1971.

20. USSR patent 1095114. [An apparatus for the study of semiconductor devices current-voltage characteristics] M.A.Lyakas, A.N.Priviten', 30.05.1984.

21. EU patent 1464968. *A method for determining the current-voltage characteristic of snap-back device*. Natarajan Mahadeva, 06.10.2004.

22. RU patent 2024031. [Device for measuring the parameters of semiconductor devices with an S-shaped CVC] N.G. Chernobrovin, M.N. Piganov, 30.11.1994.

23. USA patent 8108175. *Method for determining self-heating free I-V characteristics of a transistor*. Oiang Chen, Zhi-Yuan Wu, 31.01.2012.

24. USA patent 2896168. *Transistor characteristic curve tracers*. Donald E. Thomas, 21.07.1959.

25. USSR patent 894613. [A method for determining the two-pole voltage-current characteristic] Kukushkin V.V., Solyakov V.N., 30.12.1981.

26. USA patent 4456880. *I-V curve tracer employing parametric sampling*. Warner T., Cox C., 26.06.1984.

27. USA patent 4467275. *DC characteristics measuring system*. Koichi Maeda, Haruo Ito, 21.08.1984.

28. *International Rectifier. Application Note AN-957. Measuring HEXFET MOSFET Characteristics*. Available at: <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-957.pdf>. (12.10.2011)

29. Iermolenko I. O., Bondarenko O. F. Remote-access computer system for measurement of the current-voltage characteristics of semiconductor devices. *Proc. of the 14th Int. sc.-pract. conf. «Modern information and electronic technologies»*, Ukraine, Odessa, 2013, vol. I, pp. 113–114 (in Russian)

30. Skvortsov S. [High-performance measurement and power supply units of Keithley Instruments for electronic components and IC testing] *Chip-News*, 2005, no 7, pp. 30–32 (in Russian)

31. Agilent Technologies. *E5260A 8 Slot High speed Measurement Mainframe*. Available at: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-1356EN.pdf>. (19.03.2012)

32. Agilent Technologies. *B1530A Waveform Generator Fast Measurement Unit*. Available at: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8378EN.pdf>. (10.09.2011)

33. Davidov P. D. [Analysis and calculation of thermal modes of semiconductor devices] Moscow, Energiya, 1967, 144 p. (in Russian)

34. Chebovskii O. G., Moiseev L. G., Nedoshivin R. P. [Power semiconductor devices. Reference book] Moscow, Energoatomizdat, 1985, 401 p. (in Russian)

35. Tugov N. M., Glebov B. A., Charykov N. A. [Semiconductor devices] Moscow, Energoatomizdat, 1990, 576 p. (in Russian)

36. UA patent 96998 [A method of automated measurement of current-voltage characteristics of semiconductor devices] O. F. Bondarenko, Ye. O. Yermolenko, 2011, bul. no 24.

37. GB patent 2004/034071. *Semiconductor monitoring instrument*. Ladbroke Peter, Goodship Neil, 22.04.2004.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ефименко А. А. Проектирование межблочных электрических соединений электронных средств в базовых несущих конструкциях. — Одесса: Политехперіодика, 2013.

В книге рассматриваются вопросы проектирования межблочных электрических соединений в электронной аппаратуре, создаваемой с использованием базовых несущих конструкций (БНК). Приводится классификация и характеристика современных типов электрических соединений и БНК, формализованы задачи их проектирования. Большое внимание уделено методам и средствам проектирования межблочных электрических соединений и БНК, а также вопросам создания моделей и алгоритмов проектирования. Отдельно рассмотрены методы проектирования электромонтажа с использованием непаяных контактных соединений. Рассматриваемые методы и модели — компьютерно-ориентированные и предполагают широкое использование средств вычислительной техники.

Книга предназначена для разработчиков электронных средств. Вместе с тем, она может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.



Д. т. н. Г. А. ОБОРСКИЙ, к. т. н. О. С. САВЕЛЬЕВА, Ю. В. ШИХИРЕВА

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: okssave@mail.ru

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА

Температурный режим радиоэлектронной аппаратуры является определяющим при экспресс-оценке ее эффективности при проектировании и эксплуатации. Предлагаемый метод заключается в фиксации теплового потока, испускаемого поверхностью, и трансформации его в видимый поток с помощью тепловизора, разделении на составляющие цвета с последующим применением к ним параболического преобразования. Результатом преобразования является число, используемое в качестве экспресс-критерия для оценки стабильности распределения тепла в аппарате. Предложенный метод обеспечивает точность измерений 4–7% по сравнению с 10–18% для существующих методов тепловизионных измерений.

Ключевые слова: температурный режим, инфракрасный видеопоток, тепловизор, параболическое преобразование, критерий стабильности.

Современные электронные и электротехнические устройства состоят, как правило, из множества элементов, тепловые процессы в которых существенным образом определяют их рабочее состояние. Постоянный мониторинг таких процессов и в пространстве, и во времени является необходимым условием управления рисками в работе подобных устройств и применяется как на этапе эксплуатации, так и при их проектировании на этапе тепловых испытаний [1, 2]. Такой подход широко применяется и в смежных технических областях, где температурные поля различных поверхностей изменяются сравнительно быстро, а влияние их на состояние объекта является определяющим [3–6].

Если элементов много, латентное повышение температуры одного или нескольких из них может быть замечено слишком поздно — когда эти элементы, а значит, и все устройство в целом уже потеряли работоспособность.

Применение тепловизора (видеокамеры, преобразующей невидимые инфракрасные лучи в лучи видимого спектра) [7, 8] для мониторинга нежелательных изменений температуры в большинстве случаев не снимает проблему, т. к. за отдельными изменениями теплового поля поверхности объекта, работающего в переходных режимах как в пространстве, так и во времени, трудно уследить, а тем более, оценить их количественно. Наличие экспресс-метода интегральной оценки термических изменений объекта позволяет предотвратить нежелательное развитие событий. Однако существующие методы оперируют только видеопотоком «после тепловизора» и не принимают во внимание его цветовые со-

ставляющие. Это ограничивает их точность, составляющую не менее 10–18% [9].

Целью настоящей работы является повышение точности измерения термических параметров радиоэлектронных печатных узлов при их изготовлении и в процессе эксплуатации с помощью тепловизора путем дополнительного учета инфракрасного потока от объекта измерения «до тепловизора», а также цветовой гаммы видеопотока «после».

Схема предложенного нами экспресс-метода измерения текущих изменений в интегральной температуре элементов электронной и электротехнической аппаратуры с помощью инфракрасного (ИК) видеопотока, испускаемого их поверхностями, приведена на **рис. 1** (см. здесь, а также в цвете на 3-й стр. обложки).

Как видно из рисунка, структура системы для реализации разработанного экспресс-метода состоит из трех основных подсистем:

- аппаратной, включающей оборудование для получения и первичной обработки ИК-потоков (тепловизор, видеокамера, программы выделения смежных кадров видеопотока и их предварительной обработки);

- программной, включающей программы параболического преобразования смежных кадров видеопотока и расчета параболического критерия пространственно-временных изменений в тепловом поле поверхности объекта мониторинга;

- математической модели тепловых процессов, происходящих в объекте измерения, которая построена на методах решения нелинейных задач нестационарной теплопроводности в твер-

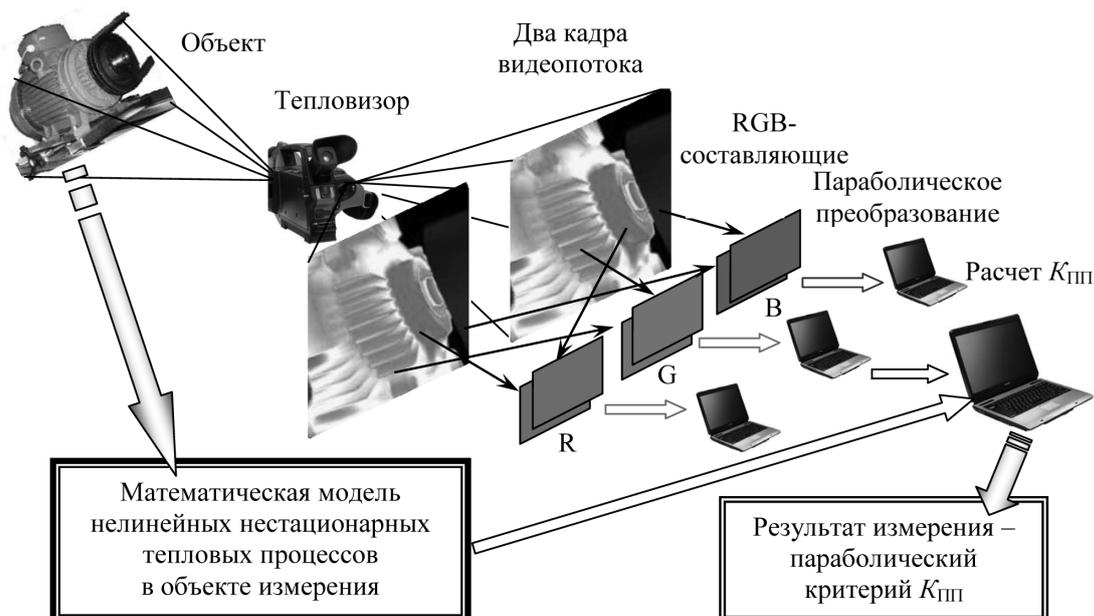


Рис. 1. Схема измерений предлагаемым экспресс-методом

дых телах [10–13] и которая необходима для проверки адекватности результатов, а также получения сравнительных значений расчетного параболического критерия [14].

Последняя подсистема при необходимости многократных измерений может быть организована с помощью электрической модели, основанной на аналогиях электрических и тепловых процессов [15].

Аппаратная и программная основы метода

В работе использовали тепловизор модели ТН-9100 – современную миниатюрную профессиональную тепловизионную систему на основе неохлаждаемого матричного детектора (UFPA) 6-го поколения. Спектральный диапазон тепловизора составляет 8–14 мкм. Общий диапазон измеряемых температур – от -40 до $+2000^{\circ}\text{C}$, реально используемый в работе – от 20 до 90°C , чувствительность менее $0,06^{\circ}\text{C}$. Прибор портативен и компактен (1,6 кг с аккумулятором и LCD-дисплеем), позволяет сохранять термоизображения на Compact Flash карте памяти и записывать текстовые и голосовые комментарии. В его состав входит встроенная цветная видеокамера $0,41 \text{ MPix}$. Прибор обладает многообразным функциями анализа и настройки термоизображений в масштабе реального времени, а также цифровыми интерфейсами IEEE1394, RS-232.

Поскольку видеопоток в декодированном виде представляет собой последовательный набор статических изображений, отдельные кадры получали с помощью программы для редактирования и обработки видеопотоков Virtualdub [16]. В результате изображения в формате TGA были представлены в виде прямоугольника размером

$I \times J$ пикселей, пронумерованных последовательно в соответствии с телевизионной разверткой. В дальнейшем предварительную обработку изображений – бинаризацию, инверсию и пр. выполняли с помощью пакетов прикладных программ Adobe Photoshop CS2 и Paint.net [17, 18].

Параболическое преобразование учитывает, как было указано выше, не только пространственное, но и временное распределение температуры на поверхности объекта, поэтому в него вовлекаются два кадра видеопотока, расстояние между которыми, измеряемое числом кадров, выбирается пользователем метода. Им же, в зависимости от скорости развития исследуемых процессов, определяется и частота кадров исходной видеосъемки.

Математическая основа метода

Как известно, сложный цвет элемента любого изображения (пиксела) интенсивностью z (z – целое число из интервала $[0, 255]$) состоит из трех составляющих: красного, зеленого и синего цветов. Аналитически это можно записать как

$$z = 0,299r + 0,587g + 0,114b, \quad (1)$$

где r, g, b – целочисленные интенсивности, соответственно, красной, зеленой и синей составляющих элемента изображения, также входящие в интервал $[0, 255]$. Коэффициенты при них получены по правилу баланса белого цвета, отражающего физиологические особенности зрения человека.

Итак, на входе математической части метода – два кадра видеопотока после бинаризации и (если необходимо) инверсии. Они содержат массивы пикселей $r_{i,j,k}$, $g_{i,j,k}$ и $b_{i,j,k}$, где i ($i \in I$),

$j (j \in J), k (k \in K)$ – дискретные номера пикселей вдоль координат (i, j) плоского изображения и времени (k) соответственно, а также их «горизонтальные» – $r_{(i-1),j,k}, g_{(i-1),j,k}, b_{(i-1),j,k}, r_{(i+1),j,k}, g_{(i+1),j,k}, b_{(i+1),j,k}$, «вертикальные» – $r_{i,(j-1),k}, g_{i,(j-1),k}, b_{i,(j-1),k}, r_{i,(j+1),k}, g_{i,(j+1),k}, b_{i,(j+1),k}$ и «временные» – $r_{i,j,(k-1)}, g_{i,j,(k-1)}, b_{i,j,(k-1)}, r_{i,j,(k+1)}, g_{i,j,(k+1)}, b_{i,j,(k+1)}$ соседи.

На выходе – коэффициенты преобразований $D_{i,j,r}, D_{i,j,g}, D_{i,j,b}$ (от каждого из цветов), полученные по формулам

$$D_{i,j,r} = \frac{r_{i,j,(k+1)} - r_{i,j,k}}{r_{(i+1),j,k} + r_{(i-1),j,k} + r_{i,(j+1),k} + r_{i,(j-1),k}}; \quad (2)$$

$$D_{i,j,g} = \frac{g_{i,j,(k+1)} - g_{i,j,k}}{g_{(i+1),j,k} + g_{(i-1),j,k} + g_{i,(j+1),k} + g_{i,(j-1),k}}; \quad (3)$$

$$D_{i,j,b} = \frac{b_{i,j,(k+1)} - b_{i,j,k}}{b_{(i+1),j,k} + b_{(i-1),j,k} + b_{i,(j+1),k} + b_{i,(j-1),k}}. \quad (4)$$

Коэффициентов $D_{i,j}$ для каждого из трех пар изображений столько, сколько в нем пикселей, т. е. $I \times J$. Пронормировав их от 0 до 255 с помощью выражений

$$r_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,r} - D_{\min r}|}{|D_{\max r} - D_{\min r}|} \right); \quad (5)$$

$$g_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,g} - D_{\min g}|}{|D_{\max g} - D_{\min g}|} \right); \quad (6)$$

$$b_{i,j}^p = \text{Int} \left(256 \frac{|D_{i,j,b} - D_{\min b}|}{|D_{\max b} - D_{\min b}|} \right), \quad (7)$$

получим три монохромных сеточных поля дискретных яркостей $r_{i,j}^p, g_{i,j}^p$ и $b_{i,j}^p$ (пример одного из них приведен на **рис. 2**), которые могут принимать одно из двух значений – «черное» 0 или «белое» 255 размером $I \times J$ каждое, соответствующие трем исходным цветам разложения.



Рис. 2. Пример результата параболического преобразования двух кадров для одного из цветов разложения

Фактически, это три новых черно-белых изображения, представляющих собой результат параболического преобразования двух цветных кадров видеопотока.

Верхний индекс « p » в выражениях (5) – (7) означает, что интенсивность относится уже не к пикселям исходного видеопотока, а к пикселям результата параболического преобразования.

Основное свойство результата параболического преобразования (**РПП**), используемое в данной работе, – наличие «белых» пикселей на «черном» фоне только в тех местах, в которых происходило изменение яркости исходных пикселей в пространстве (распространение тепла) или во времени (повышение температуры) [17–20]. Подсчитав количество «белых» пикселей на РПП трех цветных пар кадров видеопотока (N_r, N_g, N_b) и просуммировав их, можно с учетом (1) получить окончательное выражение для критерия параболического преобразования цветного видеопотока (параболического критерия)

$$K_{\text{ПП}} = 0,299N_r + 0,587N_g + 0,114N_b. \quad (8)$$

Существуют различные варианты использования этого критерия для оценки термического состояния объекта. Приведем три из них.

При стационарном режиме признаком неустойчивости работы элемента можно считать превышение параболическим критерием $K_{\text{ПП}}$ некоторого заданного верхнего порога (**рис. 3**):

$$K_{\text{ПП}} > K_{\text{ПП max}}. \quad (9)$$

При переходных режимах признаками неустойчивости работы элемента являются условия:

– если площадь S , заключенная между расчетным графиком зависимости $K_{\text{ППp}}(\tau)$ (кривая 1 на **рис. 4, а**) и графиком $K_{\text{ППt}}(\tau)$, полученным с помощью предлагаемого экспресс-метода (кривая 2), превышает некоторый заданный порог S_{max} , т. е.

$$S_{\text{max}} < S = \sum_{t=1}^T \left| \int_{\tau_{\text{нт}}}^{\tau_{\text{кт}}} K_{\text{ППp}}(\tau) d\tau - \int_{\tau_{\text{нт}}}^{\tau_{\text{кт}}} K_{\text{ППt}}(\tau) d\tau \right|, \quad (10)$$

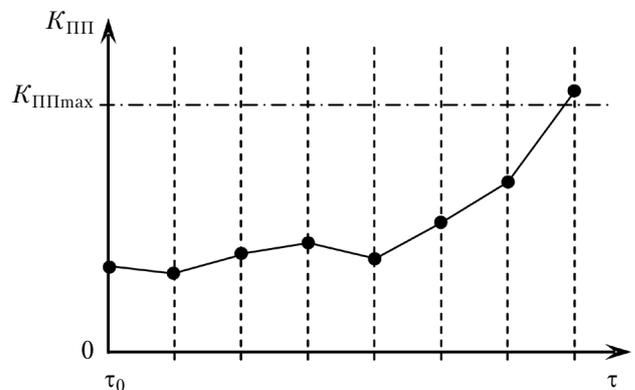


Рис. 3. График контроля во времени (τ) теплового режима объекта при стационарном режиме

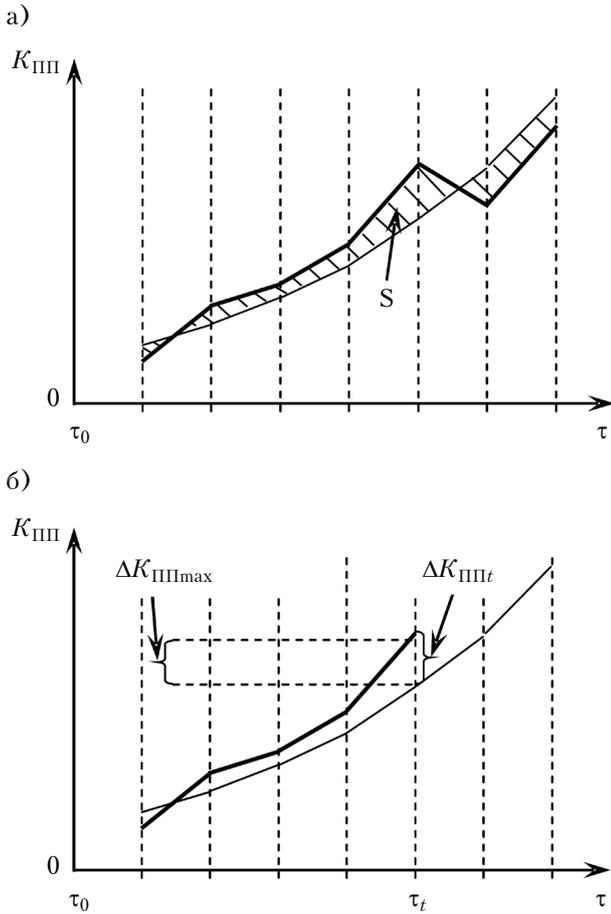


Рис. 4. Схема контроля в соответствии с критерием (10) (а) и с критерием (11) (б) теплового режима объекта при переходном режиме его работы

где $K_{III_{pr}}(\tau)$ и $K_{III_t}(\tau)$ — линейные аппроксимации дискретной переменной на t -м интервале наблюдения (см. рис. 4, а);

— если текущее (t -е) отклонение разности ΔK_{III_t} , соответствующей разности значений расчетной переходной температуры и температуры, измеренной предлагаемым экспресс-методом, превышает некоторый заданный порог $\Delta K_{III_{max}}$ (см. рис. 4, б):

$$\Delta K_{III_{max}} < \Delta K_{III_t} = |K_{III_{pr}} - K_{III_t}|. \quad (11)$$

Таким образом, предложенный критерий оценки термического состояния объекта может быть использован в качестве признака нестабильности работы элемента. Разработанный метод позволяет в режиме реального времени достаточно просто организовать контроль теплового состояния объекта (печатного узла, электромеханического устройства и т. п.), отслеживать развитие теплового процесса как в пространстве, так и во времени, благодаря чему можно заблаговременно принять решение об изменении параметров режима работы объекта или его замене. При проведении измерений предложенным методом обеспечивается точность 4–7% по срав-

нению с 10–18% для известных методов телевизионных измерений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. — Москва: Машиностроение, 1991.
2. Аксенов Ю. П., Голубев А. В., Завидей В. И. Новые подходы к контролю технического состояния трансформаторов тока типа ТФРМ на рабочем напряжении // Энергетик. — 2004. — № 3, с. 27–31; № 4, с. 35–39.
3. Оборский Г. А., Бовнегра Л. В., Шихирева Ю. В., Духанина М. А. Метод измерения тепловых параметров затвердевания бетона по инфракрасным видеопотокам от поверхности детали // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: зб. наук. праць. — Одеса: АТ Бахва, 2013 — Вип. 1(2). — С. 33–40.
4. Становский А. Л., Бовнегра Л. В., Шихирева Ю. В. Исследование остывания литейной формы с помощью параболического преобразования видеопотока от тепловизора // Матер. VIII Междунар. науч.-практ. конфер. «Литье-2012» — Запорожье. — 2012. — С. 245–247.
5. Бовнегра Л. В., Становский А. Л., Шихирева Ю. В. Оценка надежности режущего инструмента с помощью параболического преобразования видеопотока со сходящей стружки // Труды XIII Междунар. науч.-практ. конфер. «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, г. Одесса. — 2012. — С. 44.
6. Становский А. Л., Желдубовский Д. А., Шихирева Ю. В. Исследование технологических процессов литейного производства по видеопотоку от тепловизора // Матер. Междунар. науч.-практ. конфер. «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология». — Украина, г. Киев. — 2012. — С. 274–275.
7. Афонин А. В., Ньюпорт Р. К., Поляков В. С. и др. Инфракрасная термография в энергетике. Т. 1. Основы инфракрасной термографии. — Санкт-Петербург.: ПЭИПК, 2000.
8. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение. — Москва: Мир, 1988.
9. Становский А. Л., Бовнегра Л. В., Шихирева Ю. В. Разработка нового метода и средств измерения тепловых параметров затвердевания железобетона // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. — 2013. — № 4/3 (64). — С. 41–44.
10. Никитенко Н. И. Теория теплопереноса. — Киев: Наукова думка, 1983.
11. Коздоба Л. А. Решение нелинейных задач теплопроводности. — Киев: Наукова думка, 1976.
12. Беляев Н. М., Рядно А. А. Математические методы теплопроводности: Учебное пособие. — Киев: Наукова думка, 1993.
13. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Ленинград: Энергия, 1976.
14. Шихирева Ю. В., Бовнегра Л. В. Интеллектуальное информационное обеспечение тепловых измерений // Матер. XX Науч.-технич. семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». — Украина, г. Одесса. — 2012. — С. 32–34.
15. Кузьмин М. П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. — Москва: Энергия, 1974.
16. Грибунин В. Объективные метрики для оценки качества видеокодексов // Технологии защиты. — 2008. — № 2. — С. 18–21.
17. Становский П. А., Бовнегра Л. В., Шихирева Ю. В. Автоматизированный мониторинг протекания технологических процессов с помощью низкочастотных видеопотоков //

36. наук. праць Кіровоградського національного технічного університету. – 2012. – Вип. 25 (II). – С. 70–74.

18. Становский П. А., Бовнегра Л. В., Шихирева Ю. В. Параболическое преобразование полноцветного видеопотока от тепловизора // *Праці Одеського політехніч. ун-ту.* – 2012. – Вип. 2(39). – С. 67–71.

19. Бовнегра Л. В., Становский П. А., Шихирева Ю. В. Оценка состояния режущего инструмента с помощью анализа видеопотока со сходящей стружки // *Матер. XXV Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25».* – Россия, Саратов,

Волгоград; Украина, г. Харьков. – 2012. – Т. 10. – С. 32–36.

20. Бовнегра Л. В., Становский П. А., Шихирева Ю. В. Параболическое преобразование цветного видеопотока // *Матер. XX Науч.-технич. семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях».* – Украина, г. Одесса. – 2012. – С. 28–32.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 11.03 2013 г.*

Г. О. ОБОРСЬКИЙ, О. С. САВЕЛЬЄВА, Ю. В. ШИХИРЕВА

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: okssave@mail.ru

ЕКСПРЕС-МЕТОД ОЦІНКИ ЗМІН ТЕМПЕРАТУРИ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА

Температурний режим радіоелектронної апаратури є визначальним при експрес-оцінці ефективності при її проектуванні і експлуатації. Запропонований метод оцінки полягає у фіксації теплового потоку, що випускається поверхню, трансформації його у видимий потік за допомогою тепловізора, поділу на складові кольори з подальшим застосуванням до них параболічного перетворення. Результатом перетворення є число, використовуване як експрес-критерій для оцінки стабільності розподілу тепла в апараті. Запропонований метод забезпечує точність вимірювань 4–7% порівняно з 10–18% для існуючих методів тепловізійних вимірювань.

Ключові слова: температурний режим, інфрачервоний відеопотік, тепловізор, параболічне перетворення, критерій стабільності.

DOI: 10.15222/ТКЕА2014.2-3.12
UDC 681.5.08

G. A. OBORSKII, O. S. SAVEL'eva, YU. V. SHIKHIREVA

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

E-mail: okssave@mail.ru

RAPID METHOD TO ESTIMATE TEMPERATURE CHANGES IN ELECTRONICS ELEMENTS

Thermal behavior of electronic equipment is the determining factor for performing rapid assessment of the effectiveness of design and operation of the equipment. The assessment method proposed in this article consists in fixation of an infrared video stream from the surface of the device and converting it into a visible flow by means of a thermal imager, splitting it into component colors and their further processing using parabolic transformation. The result of the transformation is the number used as a rapid criterion for estimation of distribution stability of heat in the equipment.

Keywords: temperature range, infrared video stream, imager, parabolic transformation, stability criterion.

REFERENCES

1. Vavilov V.P. *Teplovye metody nerazrushayushchego kontrolya* [Thermal NDT methods: Directory]. Moscow, Mashinostroenie, 1991. (in Russian)

2. Aksenov Yu.P., Golubev A.V., Zavidel V.I. [New approaches to the control of the technical state of current transformers TFRM on the operating voltage]. *Energetic*, 2004, no 3, pp. 27-31; no 4, pp. 35-39. (in Russian)

3. Oborskii G.A., Bovnegra L.V., Shikhireva Yu.V., Dukhanina M.A. [Method for measuring thermal properties of concrete hardening on the infrared video streams from the workpiece surface]. *Informatychni tehnologii v osviti, nautzi ta vurobnutstvi: zb. nauk. pratz*, Odessa, 2013, vol. 1(2), pp. 33-40. (in Russian)

4. Stanovskii A.L., Bovnegra L.V., Shikhireva Yu.V. [Study of cooling the mold with a parabolic video conversion from thermal] *Mat. of the VIII Intern. sc.-pract. conf.*

“*Lit'yo-2012*”, Ukraine, Zaporozhye, 2012, pp. 245-247 (in Russian).

5. Bovnegra L.V., Stanovskii A.L., Shikhireva Yu.V. [Evaluation of reliability of the cutting tool with a parabolic transformation with convergent video chip]. *Proc. of the XIII Intern. sc.-pract. conf. “MIET”*, Ukraine, Odessa, 2012, p. 44. (in Russian)

6. Stanovskii A.L., D.A.Zheldubovskii, Shikhireva Yu.V. [Research process foundry on the video stream from the Imager]. *Mat. of the II Intern. sc.-pract. conf. “Foundry: technology, materials, equipment, economy and ecology”*, Ukraine, Kiev, 2012, pp. 274-275. (in Russian).

7. Afonin A.V., N'yuport R.K., Polyakov V.S. et al. *Infrakrasnaya termografiya v energetike*, vol. 1: *Osnovy infrakrasnoi termografii [Infrared thermography in the energy sector. Vol. 1: Fundamentals of infrared thermography]*. SPb., PEIPK, 2000, vol. 1, 240 p. (in Russian).

8. Gossorg Zh. *Infrakrasnaya termografiya. Osnovy. Tekhnika. Primenenie* [Infrared thermo-graphy. Basics. Tech. application]. Moscow, Mir, 1988. (in Russian)
9. Stanovskii A.L., Bovnegra L.V., Shikhireva Yu.V. [Development of a new method and means of measuring thermal properties of hardening concrete]. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2013, no 4/3 (64), pp. 41-44. (in Russian)
10. Nikitenko N.I. *Teoriya teplomassoperenosa* [The theory of heat and mass transfer]. Kiev, Naukova dumka, 1983, 352 p. (in Russian)
11. Kozdoba L.A. *Reshenie nelineinykh zadach teploprovodnosti* [Solution of nonlinear heat conduction problems]. Kiev, Naukova dumka, 1976, 136 p. (in Russian)
12. Belyaev N.M., Ryadno A.A. *Matematicheskie metody teploprovodnosti* [Mathematical methods of thermal conductivity]. Kiev, Naukova dumka, 1993, 415 p. (in Russian)
13. Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M. *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Calculations of the thermal regime of solids]. Leningrad, Energiya, 1976, 352 p. (in Russian)
14. Shikhireva Yu.V., Bovnegra L.V. [Intelligent information provision thermal measurements]. *Mat. of the XX Sc.-techn. sem. "Modelirovanie v prikladnuch nauchnuch issledovaniyach"*, Odessa, 2012, pp. 32-34. (in Russian)
15. Kuz'min M.P. *Elektricheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov teploobmena* [Electrical simulation of unsteady heat transfer processes]. Moscow, Energiya, 1974, 416 p. (in Russian)
16. Gribunin V. [Objective metrics to evaluate the quality of video codecs]. *Tekhnologii zashchity*, 2008, no 2, pp. 18-21. (in Russian)
17. Stanovskii P.A., Bovnegra L.V., Shikhireva Yu.V. [Automated monitoring of flow processes using low-frequency streams]. *Zb. nauk. prats' Kirovograds'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu*, 2012, iss. 25 (II), pp. 70-74. (in Russian)
18. Stanovskii P.A., Bovnegra L.V., Shikhireva Yu.V. [Parabolic transformation from a full-color video imager] *Works of the Odessa polytechnic university*, 2012, iss. 2(39), pp. 67-71. (in Russian)
19. Bovnegra L.V., Stanovskii P.A., Shikhireva Yu.V. [Assessment of the cutting tool by analyzing the video stream from the converging swarf]. *Mat. of the XXV Int. sc. conf. "Mathematical methods in technics and technologies – ММТТ-25"*, Russia, Saratov, Volgograd; Ukraine, Kharkiv, 2012, vol. 10, pp. 32-36. (in Russian)
20. Bovnegra L.V., Stanovskii P.A., Shikhireva Yu.V. [Parabolic transformation colored stream]. *Mat. of the XX Sc.-techn. sem. "Modelirovanie v prikladnuch nauchnuch issledovaniyach"*, Odessa, 2012, pp. 28-32. (in Russian)

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

**VI Українсько-польська науково-практична конференція
«Електроніка та інформаційні технології»**

27–31 серпня 2014 р.

Місця проведення конференції:

Львівський національний університет імені Івана Франка

Мукачівський державний університет

Спортивно-оздоровчий табір «Карпати» ЛНУ, смт. Чинадієво Закарпатської області

Робочі мови конференції: українська, англійська, польська, російська.

Тематичні напрямки роботи конференції

Інформаційні системи і технології
Мікро- та наноелектроніка
Методи і засоби обробки сигналів і зображень
Матеріали електронної техніки
Прикладні інформаційні технології і системи
Напівпровідникова електроніка та оптоелектроніка
Геоінформаційні технології та системи
Наноплазмоніка
Веб-технології
Електронні прилади та системи
Моделювання явищ, процесів і систем в електроніці
Високопродуктивні обчислювальні системи
Мікропроцесорні інформаційні системи
Комп'ютерне моделювання
Моніторинг та діагностика параметрів середовищ та матеріалів

elit2014@electronics.lnu.edu.ua

<http://www.iop.kiev.ua/new.php?id=25>

К. ф.-м. и. Ю. В. РАССОХИНА¹, д. т. и. В. Г. КРЫЖАНОВСКИЙ¹, В. А. КОВАЛЕНКО¹,
Ph. D. (techn.) P. COLANTONIO², Ph. D. (techn.) R. GIOFRE²

¹Украина, Донецкий национальный университет;

²Италия, Римский Университет Тор Вергата

E-mail: yu.rassokhina@donnu.edu.ua; Paolo.colantonio@uniroma2.it; giofr@ing.uniroma2.it

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЩЕЛЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ С МАНИПУЛЯЦИЕЙ ГАРМОНИК

Предложена и экспериментально проверена схема усилителя мощности инверсного класса F (F^{-1}) на основе GaN-транзистора NPTV00004, работающего на частоте 1,7 ГГц. Новым при этом является использование в схеме трехслойной структуры на основе щелевых резонаторов прямоугольной формы в заземляющей плоскости микрополосковой линии передачи в качестве фильтра высших гармоник. Для контроля уровней второй и третьей гармоник в спектре выходного сигнала и одновременно для согласования с 50-омной нагрузкой на рабочей частоте усилителя используется планарная периодическая структура, состоящая из двух щелевых резонаторов различной длины. КПД по добавленной мощности экспериментального макета усилителя составил 60% при выходной мощности 3,9 Вт и коэффициенте усиления 13 дБ.

Ключевые слова: усилитель мощности, класс F , инверсный класс F (F^{-1}), микрополосковая линия, щелевой резонатор.

При разработке высокоэффективных усилителей мощности (УМ) необходимо, как правило, выбирать концепцию формирования определенных форм сигнала (гармонического состава спектра тока и напряжения) транзистора для минимизации мощности, рассеиваемой в активном приборе, и увеличения достижимой выходной мощности на основной частоте [1]. В этом контексте глубоко изучены отдельные конструкторские решения, основанные на режимах работы активного элемента (транзистора) как генератора тока или переключателя. В первом случае для получения максимального КПД необходимо контролировать уровни гармоник тока и напряжения на активном элементе. В частности, наиболее простым решением, основанном на контроле уровня гармоник, является усилитель мощности класса F либо инверсного класса F (F^{-1}) [2, 3]. Преимущества усилителей мощности классов F и F^{-1} заключаются в получении большой выходной мощности, высокого коэффициента использования транзистора и ясной стратегии проектирования выходной согласующей цепи [2, 3].

Нагрузочный импеданс на стоке транзистора в усилителе класса F должен обеспечивать полусинусоидальную форму тока на стоке транзистора (т. е. содержать в спектре основную и четные гармоники) и прямоугольную форму напряжения на стоке (основную и нечетные гармоники в спектре). Однако в большинстве практических решений настраивают только вторую и третью гармоники основного сигнала, пренебрегая гармониками более высокого порядка.

Такой подход ограничивает максимально достижимый КПД усилителя мощности класса F значением 90% [2]. И наоборот, выходная согласующая цепь класса F^{-1} обеспечивает короткое замыкание на третьей гармонике основного сигнала и условие холостого хода на второй. В [4] были представлены методы проектирования усилителей мощности обоих классов, F и F^{-1} , на базе GaN-транзистора. Кроме того, было показано, что в микроволновом диапазоне проще реализуется УМ класса F^{-1} , чем УМ класса F . Теоретическое и экспериментальное сравнение усилителей указанных классов было представлено в [5–8].

В микроволновом диапазоне частот цепи усилителей мощности с фильтрацией гармоник основного сигнала реализуются с помощью соответствующих комбинаций короткозамкнутых и разомкнутых шлейфов на основе микрополосковой линии передачи [5, 6]. В [9] была предложена методика проектирования УМ класса F^{-1} с использованием схемы из отрезков сложных (композитных) линий передачи, представленных цепочкой сосредоточенных элементов по схемам фильтров нижних и верхних частот, и разомкнутых композитных шлейфов.

Целью данной работы является проверка возможности использования щелевых резонаторов в заземляющей плоскости микрополосковой линии для построения выходной согласующей цепи усилителя класса F^{-1} [10, 11]. Структура на основе прямоугольных щелевых резонаторов в подложке микрополосковой линии предназначена для контроля уровня гармоник и согласо-

вания транзистора. Данный подход был применен при разработке УМ на частоту 1,7 ГГц на основе промышленного GaN-прибора.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ**

В УМ класса F^{-1} использовался коммерческий GaN-транзистор Nitronex NPTB00004 со следующими техническими характеристиками:

- напряжение питания на стоке $V_{ds} = 28$ В;
- коэффициент усиления по мощности $G = 15,5$ дБ;
- напряжение отсечки $V_{gs} = -2$ В;
- оптимальный входной импеданс на частоте 1,7 ГГц $Z_s = 13,1 + j \cdot 24,3$ Ом;
- оптимальный импеданс нагрузки на частоте 1,7 ГГц $Z_L = 34,5 + j \cdot 48,8$ Ом.

При проектировании УМ данного класса выбиралось напряжение на затворе, соответствующее режиму класса C ($V_{gs} = -3$ В).

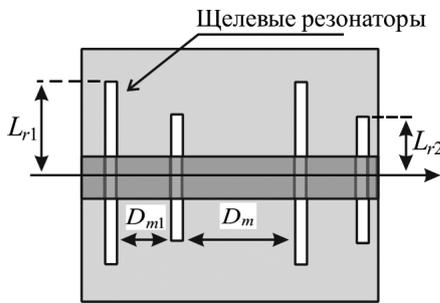


Рис. 1. Топология фильтра гармоник

Проектирование выходной согласующей цепи

Фильтр гармоник в выходной согласующей цепи был реализован с помощью двух пар щелевых резонаторов разных размеров в заземляющей плоскости микрополосковой линии передачи, как показано на рис. 1. Размеры двух щелевых резонаторов (L_{r1} и L_{r2}) рассчитывали методом поперечного резонанса как полосно-запирающие фильтры [10] для обеспечения соответствующих нагрузочных импедансов на частотах второй и третьей гармоник основной частоты $f_0 = 1,7$ ГГц. Кроме того, для учета взаимной связи между неоднородностями [11] обобщенная матрица рассеяния двухзвенной периодической структуры была протестирована с помощью коммерческой программы. Характеристики фильтра гармоник в полосе частот, полученные в результате расчетов для значений расстояния между щелевыми резонаторами $D_{m1} = 4,5$ мм и $D_m = 7,8$ мм, показаны на рис. 2 и 3. На рис. 3 отмечены значения действительной (r) и мнимой (x) частей импеданса на рабочей частоте 1,7 ГГц, нормирован-

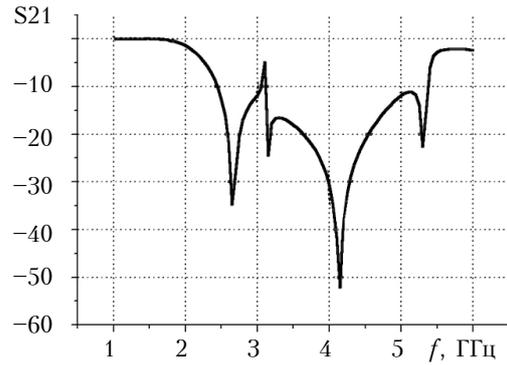


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента передачи S_{21} фильтра гармоник

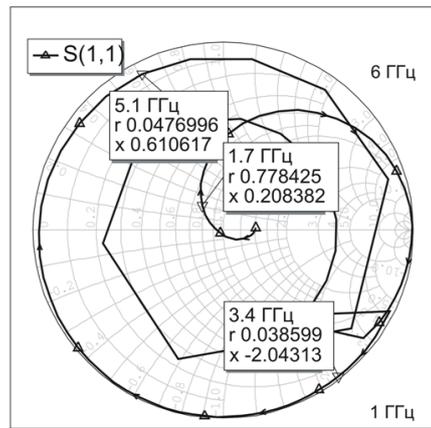


Рис. 3. Частотная характеристика коэффициента отражения S_{11} фильтра гармоник

ные на 50 Ом, а также на частотах первой и второй гармоник — 3,4 и 5,1 ГГц соответственно.

Из рисунков видно, что полосково-щелевая резонансная структура осуществляет фильтрацию выходного сигнала в диапазоне частот 2,6–5,2 ГГц. В дальнейшем характеристики фильтра были использованы для проектирования полной выходной согласующей цепи усилителя мощности, т. е. для согласования ее и на основной частоте [11]. Матрица рассеяния фильтра гармоник была рассчитана отдельно и затем включалась в расчетную схему усилителя.

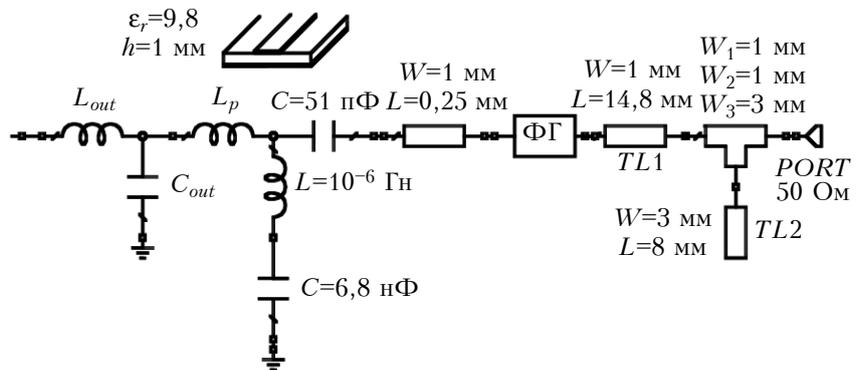


Рис. 4. Электрическая схема выходной согласующей цепи УМ класса F^{-1}

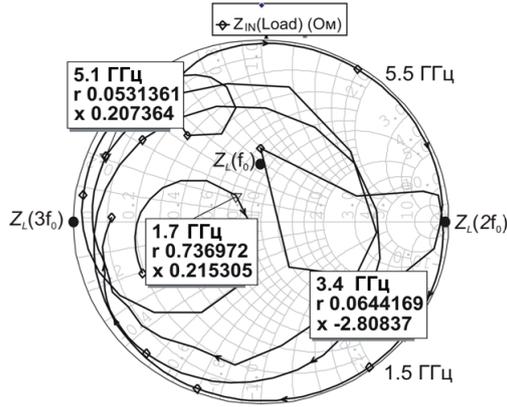


Рис. 5. Частотная характеристика входного импеданса выходной согласующей цепи УМ класса F^{-1}

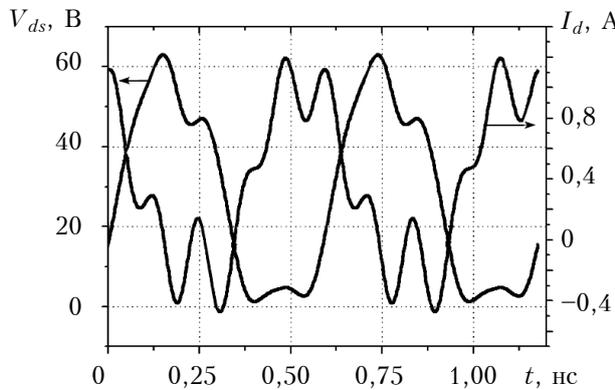


Рис. 6. Формы напряжения и тока на стоке GaN-транзистора при 1,7 ГГц (напряжения питания на стоке транзистора и смещения на затворе равны 28 В и -3,0 В соответственно)

Оптимизированная итоговая выходная согласующая цепь показана на рис. 4. Она включает в себя паразитные элементы корпуса транзистора (L_{out} , C_{out} , L_p), отрезок полосковой линии $TL1$, согласующий шлейф $TL2$ и фильтр гармоник ($\PhiГ$) на узких прямоугольных щелевых резонаторах (на рис. 4 использованы следующие обозначения: ϵ_r , h — диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрической подложки;

W , L — ширина и длина отрезков микрополосковых линий передачи, в том числе и шлейфов; C , L — емкость и индуктивность сосредоточенных элементов схемы).

Настройку усилителя при моделировании выполняли по следующей процедуре. Изменением параметров D_{m1} и D_m фильтр гармоник настраивали на максимальный уровень передачи мощности на основной частоте, при этом добивались, чтобы значение фазового сдвига между отраженными волнами второй и третьей гармоник были близки к π [7]. Затем, варьируя расстояние между ячейками двухзвенной периодической структуры D_m и длину $TL1$ и $TL2$, настраивали схему на максимальные значения выходной мощности и КПД на рабочей частоте $f_0=1,7$ ГГц. Характеристика входного импеданса оптимизированной выходной цепи без паразитных элементов корпуса приведена на рис. 5. На этом же рисунке показаны значения нагрузок на основной частоте, а также на второй и третьей гармониках при идеальной настройке схемы.

Промоделированные формы напряжения V_{ds} и тока I_d на стоке транзистора показаны на рис. 6. При этом получаются следующие значения импедансов на основной частоте и частотах высших гармоник $Z(nf_0) = V_{ds}(nf_0)/I_d(nf_0)$ (в Ом): $Z(f_0) = 46e^{-j \cdot 136^\circ}$; $Z(2f_0) = 34e^{j \cdot 90^\circ}$; $Z(3f_0) = 49e^{-j \cdot 95^\circ}$.

Проектирование входной согласующей цепи

Входная согласующая цепь усилителя проектировалась на максимум передаваемой с генератора на затвор транзистора мощности. Как показано на рис. 7, а, цепь состоит из отрезка линии передачи $TL3$ с характеристическим волновым сопротивлением 50 Ом и емкостного разомкнутого шлейфа $TL4$. Настройка и оптимизация входной согласующей цепи проведена варьированием длин этих отрезков. Значение импеданса цепи на затворе транзистора (порт 2 на схеме) составило $Z_S=11,5+j \cdot 20,5$ Ом на рабочей частоте и соответствует комплексно сопряженному значению входного импеданса активного прибора. На рис. 7, б представлена полученная в резуль-

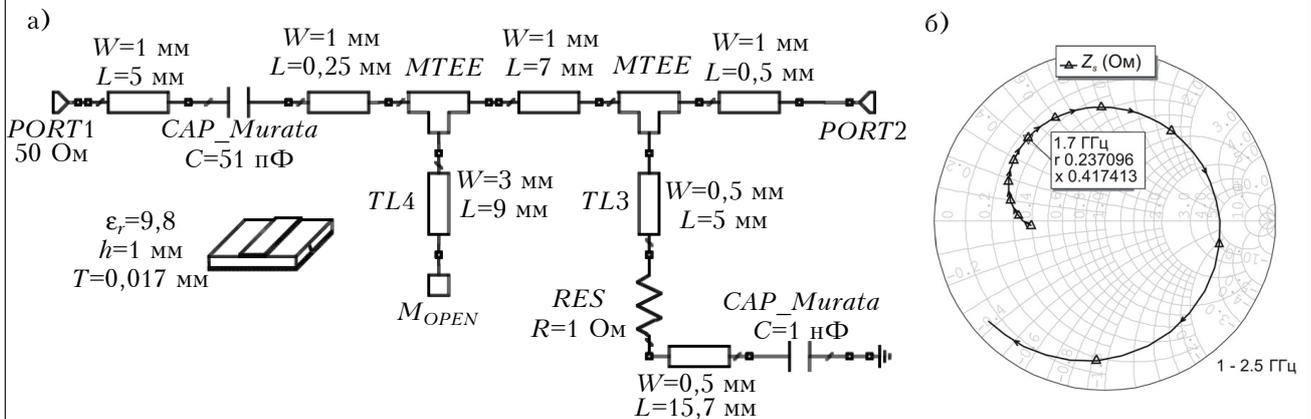


Рис. 7. Электрическая схема (а) и импеданс (б) входной согласующей цепи УМ класса F^{-1}

тате моделирования характеристика входного импеданса транзистора (действительная и мнимая части импеданса нормированы на 50 Ом).

МАКЕТ УСИЛИТЕЛЯ

Печатная плата для фильтра гармоник и усилителя в целом изготовлена на полимерном материале толщиной $h=1,0$ мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r=9,8$. Топология печатной платы для изготовления УМ показана на **рис. 8**. Печатная плата размещается на металлическом основании, в котором выполнена полость для обеспечения работы щелевых резонаторов. Фотография изготовленного макета УМ класса F^{-1} показана на **рис. 9**. Фильтр гармоник на основе щелевых резонаторов размещается в полости размерами 30×38 мм глубиной 7 мм.

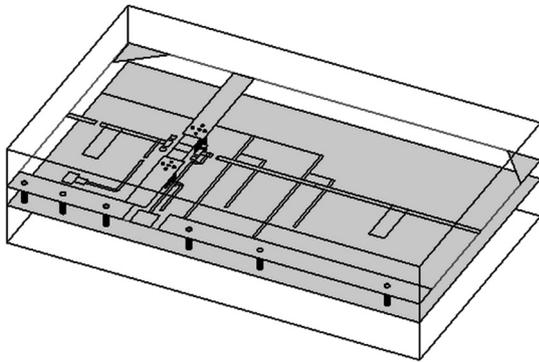


Рис. 8. Топология УМ класса F^{-1}

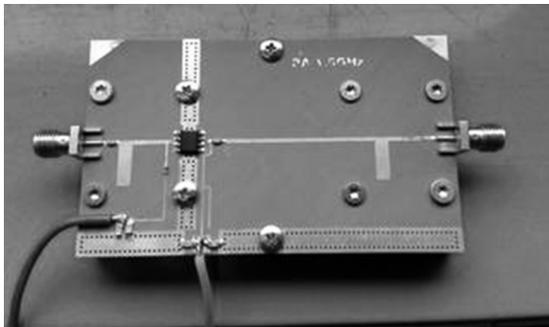


Рис. 9. Экспериментальный макет УМ

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТА

Реализованный усилитель был исследован в режиме бегущей волны. На **рис. 10** показаны измеренные выходная мощность и КПД усилителя по добавленной мощности на частоте 1,7 ГГц в зависимости от входной мощности. Выходная мощность в режиме насыщения составила 35 дБм (на 2 дБ меньше, чем в моделировании), при этом КПД усилителя составил 60%. На **рис. 11** показаны частотные зависимости выходной мощности и КПД, измеренные при входном сигнале мощностью $P_{in}=22,4$ дБм (соответствующем режиму насыщения, рис. 10). В этом случае для выходной мощности наблюдается небольшое раз-

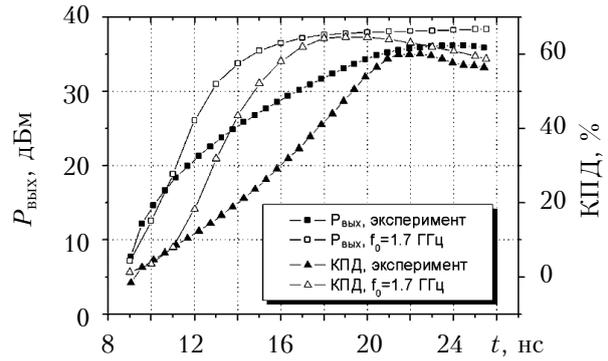


Рис. 10. Выходная мощность и КПД УМ класса F^{-1} по добавленной мощности в зависимости от входной мощности на частоте 1,7 ГГц (смещения на стоке и затворе равны 28 В и -3,0 В соответственно)

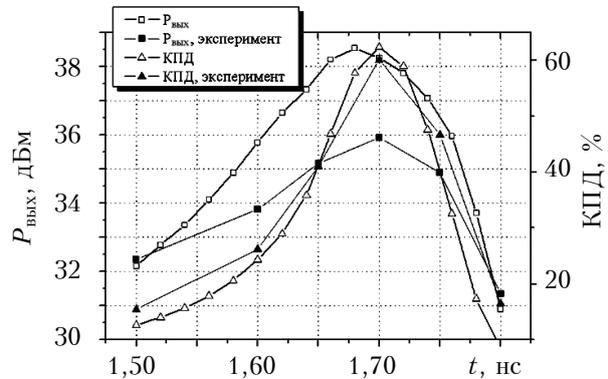


Рис. 11. Промоделированные и экспериментально измеренные выходные характеристики УМ класса F^{-1}

Мощность второй (P_2) и третьей (P_3) гармоники на выходе усилителя по отношению к выходной мощности (P_1)

Частота, ГГц	P_1/P_2 , дБ	P_1/P_3 , дБ
1,60	34,71	54,64
1,65	30,79	42,02
1,70	33,17	31,33
1,75	51,62	35,43
1,80	55,79	39,99

личие между результатами моделирования и измерений, объясняемое погрешностями коммерческой модели, оптимизированной, как правило, для режима класса B или AB [14]. Это означает, что точность модели ухудшается в области высокоэффективной нагрузочной линии с точкой смещения класса C .

Для определения уровня затухания второй и третьей гармоник в выходной цепи усилителя в **таблице** приведены результаты измерений мощности этих гармоник по отношению к выходной мощности. Видно, что с помощью щелевых ре-

зонаторов обеспечивается достаточно широкополосная фильтрация высших гармоник в выходной цепи усилителя. При этом мощность сигнала на гармониках отличается от мощности на основной частоте более чем на 30 дБ.

Заключение

Таким образом, разработан и исследован усилитель мощности инверсного класса F на GaN-транзисторе NPTB00004 с манипуляцией высших гармоник основного сигнала с помощью полосково-щелевой резонансной структуры. Его КПД по добавленной мощности на частоте 1,7 ГГц составляет 60% при выходной мощности 3,9 Вт. Результаты исследований показывают перспективность использования щелевых резонаторов (в общем случае — сложной формы) для проектирования схем высокоэффективных усилителей мощности микроволнового диапазона. Такой подход позволяет манипулировать амплитудой и фазами высших гармоник для получения высокого КПД, обеспечивает компактность схемы, а также высокий уровень подавления гармоник основного сигнала.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Colantonio F., Giannini F., and Limiti E. High efficiency RF and microwave solid state power amplifiers. — Hoboken, NJ: Wiley, 2009.
- Raab F. H. Class-F power amplifiers with maximally flat waveforms // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. — 1997. — Vol. 45, N 11. — P. 2007–2012. DOI: 10.1109/22.644215
- Raab F. H. Maximum efficiency and output of class-F power amplifiers // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. — 2001. — Vol. 49, N 6. — P. 1162–1166. DOI: 10.1109/22.925511
- Kim J. H., Do Jo G., Oh J. H. et al. Modeling and design methodology of high-efficiency class-F and class-F⁻¹ power amplifiers // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. — 2011. — Vol. 59, N 1. — P. 153–165.
- Woo Y. I. N., Yang Y., Kim B. Analysis and experiments for high-efficiency class-F and inverse class-F power amplifiers // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. — 2006. — Vol. 54, N 5. — P. 1969–1974.
- Woo Y. I. N., Yang Y., Kim I., Kim B. Efficiency comparison between highly efficient class-F and inverse class-F power amplifiers // IEEE Microwave Mag. — 2007. — Vol. 8, N 3. — P. 100–110.
- Cipriani E., Colantonio P., Giannini F., Giofrè R. Theoretical and experimental comparisons of class F vs. class F⁻¹ PAs // Proc. Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). — Paris, France. — 2010. — P. 428–431.
- Carrubba V., Clarke A. L., Akmal M. et al. On the extension of the continuous class-F mode power amplifier // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. — 2011. — Vol. 59, N 5. — P. 1294–1303. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2117435
- Dupuy A., Leong K. M. K. H., Staraj R. et al. Inverse class-F power amplifier using composite right/left-handed transmission lines as a harmonic trap // Proc. of the 36th European Microwave Conference. — 2006. — UK, Manchester. — 2006. — P. 360–363. DOI: 10.1109/EUMC.2006.281348
- Krizhanovski V. G., Rassokhina Yu. V. The transverse resonance technique modification for analysis of slot resonators in microstrip line ground plane // Труды 21-й Междунар. крымской конфер. «КрыМиКо'2011». — 2011. — Украина, Севастополь. — Т. 2. — С. 601–602.
- Rassokhina Yu. V., Krizhanovski V. G. Periodic structure on the slot resonators in microstrip transmission line // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2009. — Vol. 57, N 7. — P. 1694–1699. DOI:10.1109/TMTT.2009.2022814
- Рассохина Ю. В., Крыжановский В. Г. Анализ связанных щелевых резонаторов сложной формы в металлизированной плоскости микрополосковой линии передачи методом поперечного резонанса // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. — 2012. — Т. 55, №5. — С. 29–39. DOI: 10.3103/S0735272712050032
- Krizhanovski V. G., Rassokhina Yu. V., Colantonio P. The output circuit of inverse class F power amplifier with slot resonators in the microstrip line ground plane // Труды 21-й Междунар. крымской конфер. «КрыМиКо'2011». — 2011. — Украина, Севастополь. — Т. 1 — С. 141–142.
- Nemati H. M., Saad P., Fager Ch., Andersson K. High-efficiency power amplifier // IEEE Microwave Magazine. — 2011. — Vol. 12, N 1. — P. 81–84. DOI: 10.1109/MMM.2010.939314

*Дата поступления рукописи
в редакцию 25.10 2013 г.*

*Ю. В. РАССОХИНА, В. Г. КРИЖАНОВСЬКИЙ,
В. О. КОВАЛЕНКО, Р. COLANTONIO, R. GIOFRÈ*

*Україна, Донецький національний університет;
Італія, Римський Університет Тор Вергата
E-mail: yu.rassokhina@donnu.edu.ua;
Paolo.colantonio@uniroma2.it;
giofr@ing.uniroma2.it*

ВИКОРИСТАННЯ ЩІЛИННИХ РЕЗОНАТОРІВ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ ІЗ МАНІПУЛЯЦІЄЮ ГАРМОНІК

Запропоновано та експериментально перевірено схему підсилювача потужності на базі GaN-транзистору інверсного класу F (F^{-1}), що працює на частоті 1,7 ГГц. Новим при цьому є використання в схемі тришарової структури, що складається з щілинних резонаторів прямокутної форми у заземлювальній площині мікросмушкової лінії передачі для фільтрації вищих гармонік основного сигналу. Зокрема,

періодична планарна структура, що складається з двох пар щілинних резонаторів різної довжини, використовується для контролю рівня другої та третьої гармонік у спектрі вихідного сигналу та одночасно для узгодження із 50-омною навантаженням на робочій частоті підсилювача. Стоковий ККД експериментальної макета підсилювача склав 60% при вихідній потужності 3,9 Вт та коефіцієнті підсилення 13 дБ.

Ключові слова: підсилювач потужності, клас F, інверсний клас F (F^{-1}), мікросмушкова лінія, щілинний резонатор.

УДК 621.375.122:537.86.42
DOI: 10.15222/TKEA2014.2-3.18

Yu. V. RASSOKHINA, V. G. KRIZHANOVSKI,
V. A. KOVALENKO, P. COLANTONIO, R. GIOFRÈ

Ukraine, Donetsk National University;
Italy, University of Rome Tor Vergata
E-mail: yu.rassokhina@donnu.edu.ua;
Paolo.colantonio@uniroma2.it;
giofr@ing.uniroma2.it

INVERSE CLASS-F POWER AMPLIFIER USING SLOT RESONATORS AS A HARMONIC FILTER

The authors proposed and experimentally verified the power amplifier circuit of inverse class F (F^{-1}) based on GaN transistor NPTB00004, operating at 1,7 GHz. The novelty of this scheme is the application of a three-layer structure based on slot rectangular shaped resonators in the ground plane of the microstrip transmission line as a filter of higher harmonics. To control the levels of the second and third harmonics in the output signal spectrum and simultaneously to match the 50 ohm load at the operating frequency of the amplifier, a planar periodic structure is used, consisting of two slot resonators of different lengths. Power added efficiency for experimental model of the amplifier is 60% at an output power of 3.9 W and a gain factor of 13 dB.

Keywords: power amplifiers, class F, inverse class F, microstrip line, slot resonator.

REFERENCES

- Colantonio F., Giannini F., Limiti E. *High efficiency RF and microwave solid state power amplifiers*. Hoboken, NJ, Wiley, 2009.
- Raab F. H. Class-F power amplifiers with maximally flat waveforms. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1997, vol. 45, N 11, pp. 2007-2012. DOI: 10.1109/22.644215
- Raab F. H. Maximum efficiency and output of class-F power amplifiers. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2001, vol. 49, no 6, pp. 1162-1166. DOI: 10.1109/22.925511
- Kim J. H., Do Jo G., Oh J. H. et al. Modeling and design methodology of high-efficiency class-F and class- F^{-1} power amplifiers. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2011, vol. 59, no 1, pp. 153-165.
- Woo Y. I. N., Yang Y., Kim B. Analysis and experiments for high-efficiency class-F and inverse class-F power amplifiers. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2006, vol. 54, no 5, pp. 1969-1974.
- Woo Y. I. N., Yang Y., Kim I., Kim B. Efficiency comparison between highly efficient class-F and inverse class-F power amplifiers. *IEEE Microwave Mag.*, 2007, vol. 8, no 3, pp. 100-110.
- Cipriani E., Colantonio P., Giannini F., Giofrè R. Theoretical and experimental comparisons of class F vs. class F^{-1} PAs. *Proc. of the Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, Paris, France, 2010, pp. 428-431.
- Carrubba V., Clarke A. L., Akmal M., Lees J., Benedikt J., Tasker P.J., Cripps S.C. On the extension of the continuous class-F mode power amplifier. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2011, vol. 59, no 5, pp. 1294-1303. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2117435
- Dupuy A., Leong K. M. K. H., Staraj R., Jacquemod G., Itoh T. Inverse class-F power amplifier using composite right/left-handed transmission lines as a harmonic trap. *Proc. of the 36th European Microwave Conference*, Manchester, UK, 2006, pp. 360-363. DOI: 10.1109/EUMC.2006.281348
- Krizhanovski V. G., Rassokhina Yu. V. The transverse resonance technique modification for analysis of slot resonators in microstrip line ground plane. *Proc. of the 21th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo)*, 2011, vol. 2, pp. 601-602.
- Rassokhina Yu. V., Krizhanovski V.G. Periodic structure on the slot resonators in microstrip transmission line. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, vol. 57, no 7, pp. 1694-1699. DOI:10.1109/TMTT.2009.2022814
- Rassokhina Yu. V., Krizhanovski V. G. Analysis of coupled slot resonators of complex shape in metalization plane of a micro-strip transmission line using the transversal resonance techniques. *Radioelectron. Commun. Syst.*, 2012, vol. 55, no 5, pp. 214-222. DOI: 10.3103/S0735272712050032
- Krizhanovski V.G., Rassokhina Yu.V., Colantonio P. The output circuit of inverse class F power amplifier with slot resonators in the microstrip line ground plane. *Proc. of the 21th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo)*, 2011, vol. 1, pp. 141-142.
- Nemati H. M., Saad P., Fager Ch., Andersson K. High-efficiency power amplifier, *IEEE Microwave Magazine*, 2011, vol. 12, no 1, pp. 81-84. DOI: 10.1109/MMM.2010.939314

К. т. н. Ю. Н. ЛАВРИЧ, д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН, В. Я. КРЫСЬ, Л. М. ПОГОРЕЛАЯ,
к. ф.-м. н. И. И. СОКОЛОВСКИЙ

Украина, г. Днепропетровск, Институт транспортных систем и технологий НАНУ «Трансмаг»
E-mail: plm@westa-inter-com

ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ СВЧ-МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Разработан быстродействующий двухканальный переключатель СВЧ-мощности в трехсантиметровом диапазоне длин волн с использованием двух объемных полупроводниковых структур с отрицательной дифференциальной проводимостью, обладающих вольт-амперными характеристиками N - и S -образной формы. Эти структуры реализуют соответственно функции амплитудного модулятора мощности на диоде Ганна и коммутатора на диоде из халькогенидного стеклообразного полупроводника.

Ключевые слова: отрицательная дифференциальная проводимость, коммутация, модуляция, СВЧ-мощность.

При необходимости перекоммутации мощности в устройствах СВЧ-аппаратуры, таких как модуляторы, дискретные фазовращатели, многоканальные коммутаторы и др., применяют специальные каналные переключатели [1]. При использовании для этих целей $p-i-n$ -диодов с управляемой напряжением проводимостью требования к модуляции и быстродействию противоречат друг другу — для получения глубокой модуляции необходима смена полярности управляющего напряжения, что сказывается на быстродействии. Кроме того, скорость коммутации зависит не только от крутизны фронтов управляющего напряжения, но и от инерционности самих $p-i-n$ -диодов, в связи с чем необходимо наличие дополнительных «ускоряющих» и «вытягивающих» импульсов. К тому же, при проектировании $p-i-n$ -диодов разработчики сталкиваются с противоречащими друг другу требованиями к быстродействию, энергопотреблению и диапазону частот.

Задачей настоящего исследования была разработка быстродействующего двухканального переключателя СВЧ-мощности для радиоволновой информационно-управляющей системы магнитолевитирующих транспортных средств с электродинамическим подвешиванием [2]. Для ее решения в схеме переключения были использованы обладающие отрицательной дифференциальной проводимостью структуры полупроводниковых материалов с вольт-амперными характеристиками N -образной и S -образной формы.

В халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП), обладающих отрицательной дифференциальной проводимостью S -типа, об-

наружен ряд свойств, среди которых особое место занимает электрическая неустойчивость, сопровождающаяся изменением фазового состояния материала [3], что проявляется в резком и быстром переходе состояния структуры из высокоомного в низкоомное. Сопротивление изменяется на много порядков ($10^3 - 10^6$ раз) [4], а время переключения для ХСП-структур различного стехиометрического состава составляет примерно $1,5 \cdot 10^{-10}$ с. Миниатюрность диодных ХСП-структур позволяет использовать их для коротковолновой части миллиметрового диапазона [5]. Однако даже при наложении стирающего импульса диод остается в низкоомном состоянии из-за присущего ХСП-материалу эффекту памяти (удержание инжектированных носителей в СВЧ-поле, снижение вероятности их выхода из активной зоны и, следовательно, затруднение процессов деполяризации, ведущих к восстановлению исходного высокоомного состояния).

Возможным решением указанной проблемы в нашем случае может быть введение быстродействующего амплитудного модулятора на основе диода Ганна в состав переключателя для прерывания СВЧ-сигнала, поступающего на ХСП-диод. Диод Ганна представляет собой двухэлектродную объемную полупроводниковую структуру, которая при определенном значении приложенного к ней электрического поля проявляет отрицательную дифференциальную проводимость N -типа, вследствие чего возникают электрические колебания в СВЧ-диапазоне длин волн.

Экспериментальные исследования проводились на установке, структурная схема которой приведена на **рис. 1**.

Использовались серийно выпускаемые диоды Ганна типа ЗА723Б и экспериментальные

Авторы выражают благодарность В. А. Шкуту за помощь в изготовлении ХСП-структур.

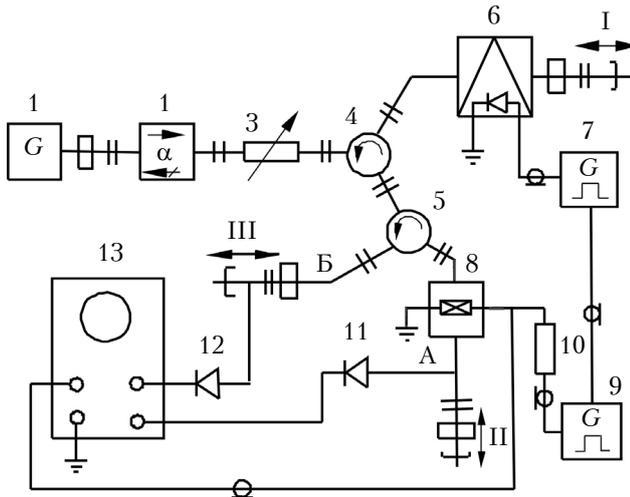


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:

1 — СВЧ-генератор с волноводным выходом; 2 — вентиль; 3 — аттенуатор; 4, 5 — трехплечие циркуляторы; 6 — амплитудный модулятор на основе диода Ганна; 7, 9 — генераторы прямоугольных импульсов для управления диодом Ганна и ХСП-диодом соответственно; 8 — ячейка с ХСП-диодом; 10 — нагрузочное сопротивление; 11, 12 — детекторные диоды; 13 — осциллограф; I, II, III — волноводные подвижные коротко замыкающие поршни

сэндвич-структуры из стеклообразного материала системы As—Te—Si с толщиной активной области 1,2 мкм. Структуры получены термическим напылением в вакууме на медную подложку дискообразной формы диаметром 2—2,5 мм, которая выполняет роль одного из электродов и теплоотвода. Второй вывод диода представлял собой тонкую вольфрамовую проволоку, фиксируемую на поверхности ХСП-пленки эпоксидной смолой ЭД-20.

Диод Ганна устанавливали в волноводную модуляторную камеру между широкими стенками волновода. На него подавалось модулирующее напряжение от генератора 7 прямоугольных импульсов с крутыми фронтами, построенного на лампах со вторичной эмиссией 6В2П. При напряжении смещения выше порогового диод генерировал сигнал мощностью 28 мВт. Волноводные подвижные короткозамыкающие поршни I, II, III предназначены для обеспечения оптимального режима модулятора. СВЧ-генерация подавлялась изменением положения диода в волноводе вдоль узких стенок и регулировкой настроечных винтов, образующих трансформатор полных сопротивлений. Подавление генерации происходило в соответствии с механизмом сдерживания флуктуационной неустойчивости внешней цепью [5], так что диод Ганна представлял собой двухполосник, импеданс которого управляется смещающим напряжением.

ХСП-диод припаивали к нижней стенке тонкой (примерно 2,5 мм) емкостной диафрагмы, устанавливаемой между волноводными фланцами. Управляющее напряжение подавалось на

проволочный вывод через фильтр нижних частот (на рис. 1 не показан), конструктивно представляющий собой коаксиальную емкость — электроизолирующий слой на проволочном выводе. На расстоянии $a/4$ (a — размер широкой стенки волновода) от ХСП-диода устанавливали два регулировочных штыря (I, II), а на расстоянии половины длины волны в волноводе $\lambda_B/2$ от плоскости диафрагмы — третий регулировочный штырь (III), т. е. реализовывалась инверсная схема включения [6]. Исходное сопротивление ХСП-диода составляло 379 кОм, сопротивление в низкоомном состоянии находилось в пределах 3—10 Ом в зависимости от тока открытого состояния.

Процесс переключения мощности в каналах во времени t при изменении внутреннего сопротивления ХСП-диода проиллюстрирован на рис. 2.

В исходном состоянии ХСП-диод представляет собой высокоомный элемент. Сигнал отражается от ячейки 8 с ХСП-диодом, поступает в канал Б и фиксируется индикаторным устройством (детектором 12 и осциллографом 13, рис. 1). Перевод ХСП-диода в низкоомное со-

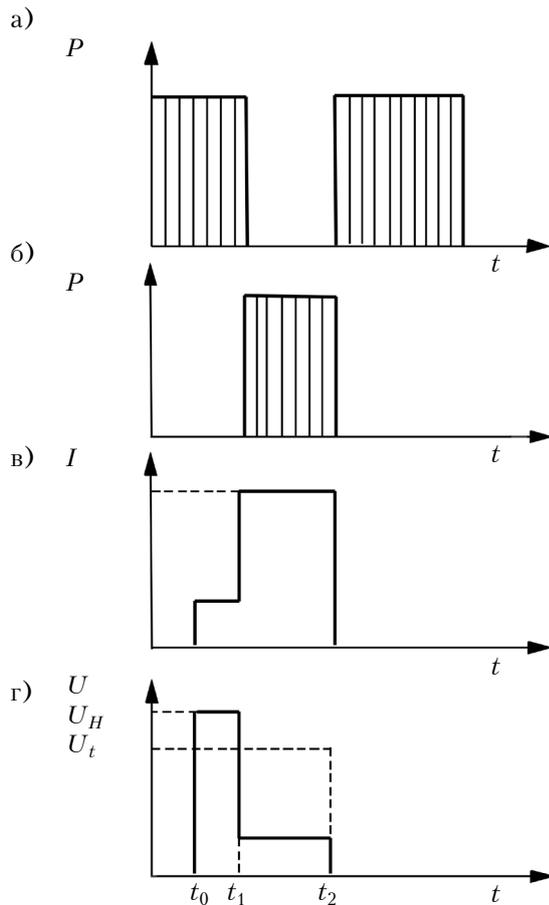


Рис. 2. Иллюстрация переключения мощности в каналах:

a, б — СВЧ-мощность на детекторных диодах 12 и 11 соответственно; в, г — импульсы соответственно тока и напряжения на ХСП-диоде

стояние осуществляется импульсом $U_H > U_t$ длительностью $\tau_n = t_2 - t_0$, который подается генератором 9 (синхронизирован с генератором 7 по фронтам импульсов) и обеспечивает подвод к диоду энергии, большей некоторого значения $W = \chi U_0 I_0(t_0) \tau_n$ (χ — эмпирический коэффициент, зависящий от состава стекла и условий теплоотвода, U_0, I_0 — напряжение и ток поддержания открытого состояния соответственно).

При переходе в низкоомное состояние в момент времени t_1 СВЧ-сигнал проходит через ячейку 8, поступает в канал А и регистрируется индикаторным устройством (детекторным диодом 11 и осциллографом 13). Для вывода ХСП-диода из низкоомного состояния (состояния с эффектом памяти) при наличии СВЧ-мощности и осуществления перекоммутации в момент времени t_3 (рис. 3) на ХСП-диод подается стирающий импульс от генератора 9 длительностью $\tau_c = t_4 - t_3$. Величина импульса достаточна для того, чтобы за время τ_p отсутствия СВЧ-мощности на ХСП-диоде (из-за поглощения мощности диодом Ганна) перевести диод в высокоомное состояние.

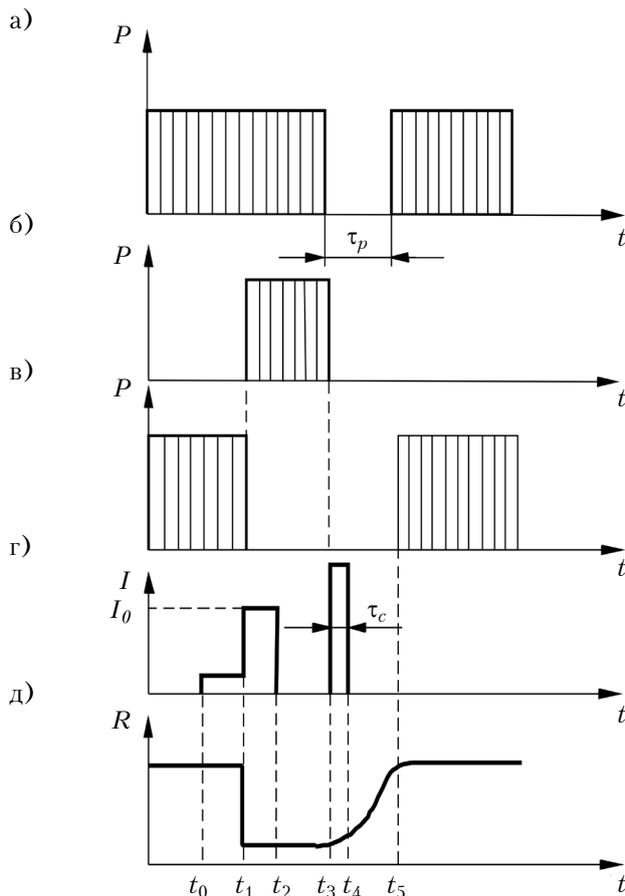


Рис. 3. Временные соотношения импульсов при переводе ХСП-диода в низкоомное состояние:
 а — СВЧ-мощность на входе циркулятора 5; б — СВЧ-мощность в канале А; в — СВЧ-мощность в канале Б; г — ток через ХСП-структуру; д — временное изменение сопротивления ХСП-структуры

Используемая инверсная схема включения ХСП-ячейки обеспечивала высокие характеристики коммутации при выполнении условия [6] равенства по модулю емкостного реактанса настроечных штырей X_C , индуктивного реактанса проводника к ХСП-диоду X_L и емкостного реактанса ХСП-диода в высокоомном состоянии X_d : $|X_C| = |X_L| = |X_d|$. В ситуации когда ХСП-диод находится в низкоомном состоянии, система штырей образует параллельный резонансный контур ($X_C = X_L$) и СВЧ-сигнал с малыми потерями проходит через ХСП-диод в канал А и фиксируется индикаторным устройством. Когда ХСП-диод переходит в высокоомное состояние, емкость ХСП-диода и индуктивность проводника образуют последовательный резонансный контур ($X_L = X_d$). СВЧ-мощность отражается от ХСП-диода и поступает в канал Б и фиксируется соответствующим индикаторным устройством.

Разработанное переключающее устройство СВЧ-диапазона, построенное на доступной СВЧ-элементной базе и с учетом тенденций развития новых полупроводниковых материалов, представляет собой функционально законченный узел с гарантированным быстродействием и имеет следующие коммутационные характеристики:

- потери на запирающие на центральной частоте 9440 МГц не менее 30 дБ;
- прямые потери при коммутации мощности около 10 мВт менее 0,5 дБ
- потребляемый ХСП-диодом ток на реализацию коммутации 150 мкА;
- время переключения не более 10^{-10} с.

Совместное использование полупроводниковых элементов с вольт-амперными характеристиками N- и S-типа — диода Ганна и ХСП-диода — позволяет реализовать быстродействующий двухканальный переключатель в СВЧ-диапазоне, который в режиме функционирования расходует лишь мощность, потребляемую диодом Ганна, в то время как ХСП-диод потребляет энергию управляющего тока лишь в момент коммутации каналов. Это важно, например, для радиоволновой информационно-управляющей системы магнитолевитирующих транспортных средств с электродинамическим подвешиванием.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rebeiz G. M., Uzunkol M. A Low-loss 50-70 GHz SPDT switch in 90 nm CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits. — 2010. — Vol. 45, N 10. — P. 2003–2007.
2. Plaksin S. V., Sokolovskiy I. I., Pogorelaya L. M. The synthesis of a fast-acting information-control system on

the base of hot-electron devices // *Telecommunications and Radio Engineering*. — 2006. — Vol. 65, N 8. — P. 741—756.

3. Лебедев Э. А., Цендин К. Д. Фазовые переходы, происходящие в халькогенидных стеклообразных полупроводниках, при воздействии на них импульсов электрического поля и лазерного излучения // *ФТП*. — 1998. — Т. 32, № 8. — С. 939—943.

4. Исаев А. И., Мехтиева С. И., Гарибова С. Н., Зейналов В. З. Электропроводность слоев халькогенидного стеклообразного полупроводника $\text{Se}_{95}\text{As}_5$, содержащего примеси редкоземельных атомов EuF_3 , в сильных

электрических полях // *ФТП*. — 2012. — Т. 46, № 9. — С. 1138—1142.

5. Плаксин С. В., Соколовский И. И. Физические основы построения быстродействующих информационно-управляющих систем на базе полупроводников с горячими электронами. — Севастополь: Вебер, 2006.

6. Белова И. Ф., Дивакова Е. К., Лебедев Е. И. Об одном варианте включения p-i-n-диода в волноводе // *Радиотехника*. — 1974. — Т. 29, № 8. — С. 114—117.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 07.02 2014 г.*

Ю. М. ЛАВРИЧ, С. В. ПЛАКСИН, В. Я. КРИСЬ, Л. М. ПОГОРЕЛА, І. І. СОКОЛОВСЬКИЙ

Україна, м. Дніпропетровськ, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ «Трансмаг»

E-mail: plm@westa-inter-com

ДВОХКАНАЛЬНИЙ ПЕРЕМИКАЧ НВЧ-ПОТУЖНОСТІ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРИЧНО АКТИВНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР

Розроблено двохканальний комутатор НВЧ-потужності в 3-см діапазоні довжини хвиль з використанням двох об'ємних напівпровідникових структур, які мають негативну диференціальну провідність, з вольт-амперними характеристиками N- та S-подібними формами. Ці структури реалізують функції амплітудного модулятора потужності на діоді Ганна та комутатора на діоді з халькогенидного склоподібного напівпровідника.

Ключові слова: негативна диференціальна провідність, комутація, модуляція, НВЧ-потужність.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2-3.25

UDC 621.317: 621.3.08

Yu. N. LAVRICH, S. V. PLAKSIN,

V. Ya. KRIS, L. M. POGORELAYA, I. I. SOKOLOVSKIY

Ukraine, Dnepropetrovsk, Institute of the transport systems and technologies of the NAS of Ukraine «Transmag»

E-mail: plm@westa-inter-com

TWO-CHANNEL MICROWAVE POWER SWITCH CONSTRUCTION ON THE BASIS OF ELECTRICALLY ACTIVE SEMICONDUCTOR STRUCTURES

When constructing the fast-acting two-channel microwave switch, it is difficult to use p-i-n-diodes due to inertia of processes in such structures at change of control voltage polarity for providing of deep modulation. Under the practical realization of the microwave switches on p-i-n-diodes, the requirements to the operating speed of the output signal and to the frequency range are in conflict with each other.

The optimum decision may be to use the bulk (without p-n-junctions) two-electrode semiconductor structures based on the effect of intervalley transfer of electrons (TEDs) and chalcogenide-glass-semiconductors (CGS-diodes) with high operating speed and stability at considerable power levels in the wide frequency band.

The paper presents the construction of the two-channel microwave switch in the three-centimeter range of wave lengths based on bulk semiconductor structures having negative differential conductivity (NDC) of N- and S-type, and realizing the functions of peak power modulator on a TED-diode and the switch on a CGS-diode respectively.

Keywords: negative differential conductivity, commutation, modulation, microwave power.

REFERENCES

1. Rebeiz G.M., Uzunkol M. A low-loss 50–70 GHz SPDT switch in 90 nm CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2010, vol. 45, no 10, pp. 2003–2007.

2. Plaksin S.V., Sokolovskiy I.I., Pogorelaya L.M. The synthesis of a fast-acting information-control system on the base of hot-electron devices. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2006, vol. 65, no 8, pp. 741—756.

3. Lebedev E. A., Tsending K.D. Phase transitions occurring in glassy chalcogenide semiconductors induced by electric field or laser pulses, *Semiconductors*, 1998, vol. 32, iss. 8, pp. 838—842.

4. Isayev A.I., Mekhtieva S.I., Garibova S.N., Zeynalov V.Z. Conductivity of $\text{Se}_{95}\text{As}_5$ chalcogenide glassy semicon-

ductor layers containing the EuF_3 rare-earth impurity in high electric fields, *Semiconductors*, 2012, vol. 46, iss. 9, pp. 1114—1118.

5. Plaksin S.V., Sokolovskii I.I. *Fizicheskie osnovy postroeniya bystrodeistvuyushchikh informatsionno-upravlyayushchikh sistem na baze poluprovodnikov s goryachimi elektronami* [The physical foundation of construction of the fast-acting informative-control systems based on semiconductors with hot electrons] Sevastopol, Veber, 2006, 320 p. (in Russian)

6. Belova I.F., Divakova E.K., Lebedev E.I. [About one variant of p-i-n-diode inclusion into the waveguide] *Radiotekhnika*, 1974, vol. 29, no 8, pp. 114—117 (in Russian)

К. ф.-м. н. Р. Л. ПОЛИТАНСКИЙ, к. т. н. П. М. ШПАТАРЬ,
А. В. ГРЕСЬ, к. т. н. А. Д. ВЕРИГА

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
E-mail: alexgs85@ukr.net

СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ШИФРОВАНИЕМ ХАОТИЧЕСКИМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ

Предложена система передачи данных, зашифрованных последовательностями, которые сформированы на основе одномерных дискретных хаотических отображений. Рассмотрен принцип работы системы на примере передачи данных между двумя компьютерами.

Ключевые слова: динамическая система, хаотическая последовательность, начальные условия, логистическое отображение.

Перспективным направлением развития информационных и телекоммуникационных систем является использование широкополосных систем связи, базирующихся на явлении синхронизации генераторов хаоса. В системах данного класса могут использоваться сигналы, сформированные с использованием псевдослучайных последовательностей. Сигналы, генерируемые нелинейными динамическими системами, являются новым классом сигналов, возможность использования которых в системах связи определяется их свойствами [1, 2]. Одной из основных проблем, возникающих при построении таких систем, является обеспечение синхронизации между принимающей и передающей сторонами систем связи. Большинство способов скрытой передачи информации с синхронизацией хаосом основано на режиме полной хаотической синхронизации, что влечет за собой требование к высокой степени идентичности генераторов, располагающихся на передающей и приемной сторонах системы передачи информации. Совершенствование методов скрытой передачи данных на основе систем с хаотической синхронизацией стало в последнее время одной из важных задач в области создания информационно-телекоммуникационных систем на основе хаоса [3].

Цель настоящей работы заключается в экспериментальной реализации системы передачи данных, зашифрованных псевдослучайными последовательностями, которые генерируются на основе одномерных дискретных хаотических отображений с обеспечением синхронизации передающей и принимающей сторон системы.

Современные телекоммуникационные системы требуют обеспечения высокой скрытности и конфиденциальности связи. Защита передаваемой информации от несанкционированного доступа в телекоммуникационных системах возможна путем ее шифрования, заключающегося в наложении гаммирующей последовательности на открытый текст. В качестве таких последовательностей могут быть использованы псевдохаотические последовательности, алгоритмы генерирования которых реализуются на основании динамического хаоса, чувствительного к изменению начальных условий. Для генерирования цифровых хаотических последовательностей используется определенная функция, значения которой при определенных начальных условиях равномерно распределены на ограниченном отрезке. Этим свойством обладают решения логистического уравнения [4, 5]

$$x_{n+1} = \lambda x_n(1-x_n), \quad (1)$$

где λ , x_n — начальные условия для генерирования последовательностей. Генерирование хаотической последовательности в соответствии с этим уравнением имеет место при $\lambda = 3,65 - 3,95$.

Структурные схемы предложенной системы передачи информации, а также схемы кодера и декодера системы приведены на **рис. 1** и **2** соответственно.

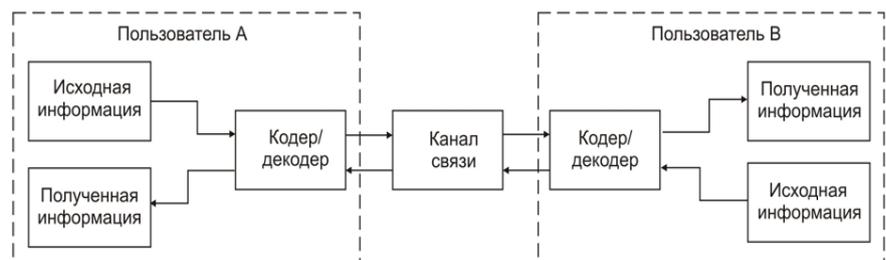


Рис. 1. Структурная схема системы передачи текстовой информации, зашифрованной хаотическими последовательностями

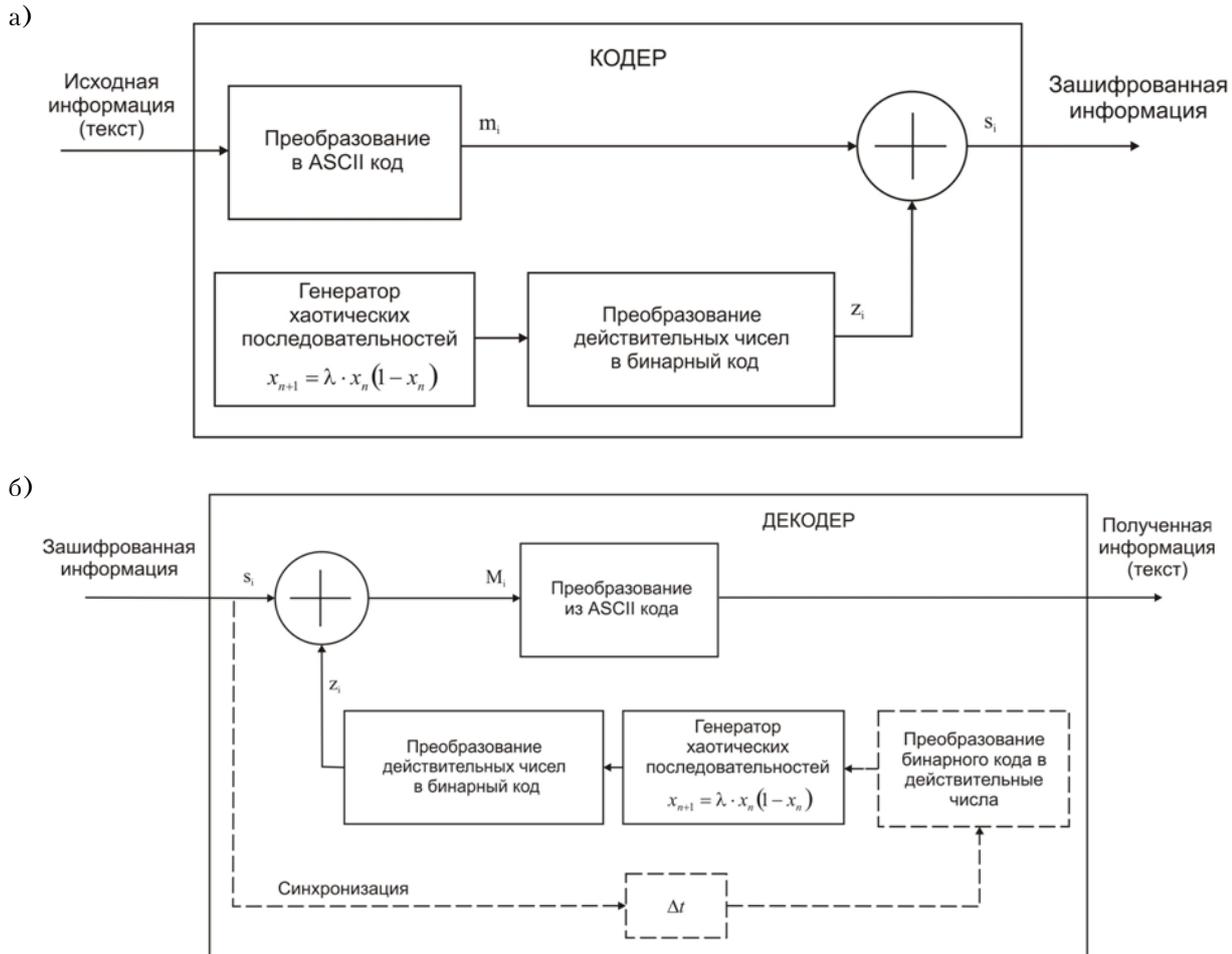


Рис. 2. Структурные схемы кодера (а) и декодера (б) системы передачи информации

Исходные данные (текст) из источника информации, поступая на вход кодера системы, преобразуются в 8-битовые символы в соответствии с таблицей кода ASCII. Для генерирования псевдослучайных последовательностей используется логистическое дискретное хаотическое отображение (логистическое отображение)

$$x_{n+1} = 3,85x_n(1-x_n). \quad (2)$$

Генерируемая последовательность чисел преобразуется в двоичные 8-битовые символы в соответствии с формулой [5]

$$z_n = 2^{-1} b_{n1} + 2^{-2} b_{n2} + \dots + 2^{-L} b_{nL}, \quad (3)$$

где L — разрядность двоичного представления.

Представленное символами информационное сообщение m_i суммируется по модулю 2 с элементами псевдослучайной последовательности

$$s_i = m_i \oplus z_i. \quad (4)$$

Дешифрование информации осуществляется путем суммирования по модулю 2 полученного сообщения с псевдослучайной последовательностью, генерируемой на приемной стороне с ис-

пользованием того же логистического уравнения при тех же начальных условиях [6–8].

Ключом шифрования системы является значение параметра логистического отображения λ и начальное значение x_n . Криптостойкость системы обуславливается количеством ключей шифрования. Количество ключей шифрования для двухпараметрической системы равно

$$N = (10^n)^2, \quad (5)$$

где n — точность введения параметров (количество знаков после запятой).

В нашем случае точность введения n для начальных условий λ и x_n задана программно и составляет 10. Соответственно, пространство ключей будет составлять 10^{20} , что является достаточно хорошим результатом для двухпараметрической системы. В таких системах возможность передачи информации с минимальным количеством ошибок в принятом тексте обеспечивается путем использования одного из способов синхронизации (полной, обобщенной, фазовой и др.). Авторами [9–11] синхронизация осуществлялась синхроимпульсами, не изменяющимися по форме

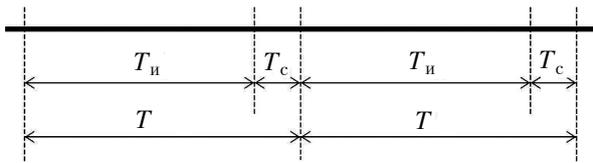


Рис. 3. Временная диаграмма передачи синхроимпульса и информационного сообщения

и длительности, при этом имела место периодическая передача синхроимпульса через интервал времени, состоящий из длительности информационной ($T_{и}$) и синхронизирующей ($T_{с}$) последовательностей.

Временная диаграмма процесса передачи синхроимпульса и информационного сообщения приведена на рис. 3 [9 – 11]. В данной системе предложено осуществление синхронизации путем передачи через определенные интервалы времени текущего значения x_n , генерируемого логистическим отображением. Период передачи x_n зависит от быстродействия компьютера и расстояния между абонентами системы, а его значение определяется путем передачи тестового сообщения перед началом сеанса связи. Безошибочный прием тестового сообщения свидетельствует об оптимальном подбore периода передачи текущего значения x_n . Подбор периода осуществляется на программном уровне. Максимальное значение периода передачи x_n исследуемой нами системы на компьютерах марки Intel P-IV 2,4 ГГц, находящихся на расстоянии 100 м, составило 27,8 мкс. При значениях периода меньше 27,8 мкс имеет место стабильная синхронизация. Предложенный метод синхронизации передающей и принимающей сторон обеспечивает безошибочную передачу и прием текста, состоящего из 10000 символов украинского, русского и английского алфавита.

Результаты работы

Для построения системы связи использовались современные программные средства, в частности язык Delphi 7.0 Система работает в реальном времени в полнодуплексном режиме при любой аппаратной реализации доступа к сети Интернет. Пользователям системы связи достаточно указать только IP-адреса. Результаты работы программы приведены на рис. 4.

На рис. 4, а изображено окно программы пользователя А, который передает пользователю В сообщение «Кафедра радиотехники и информационной безопасности Черновицкого национального университета имени Юрия Федьковича». В поле имени получателя введен IP-адрес пользователя В (10.105.0.83). При этом значение параметра ключа шифрования λ для передающей и принимающей сторон равнялось 3,85. Начальное значение x_n вводится только организатором зашифрованного обмена сообщениями (например, пользовате-

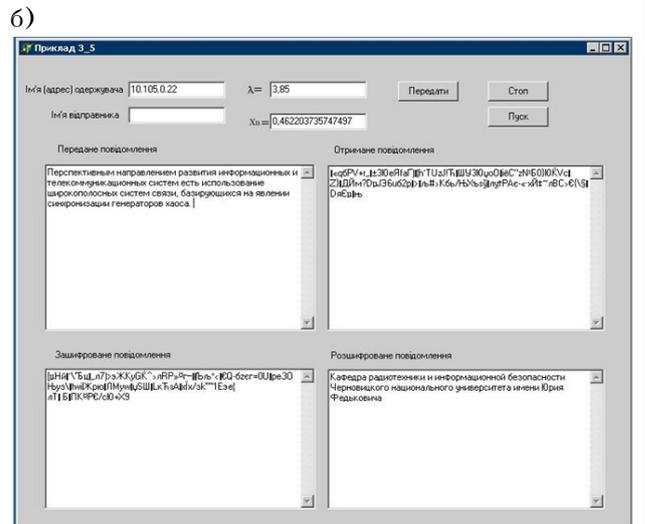
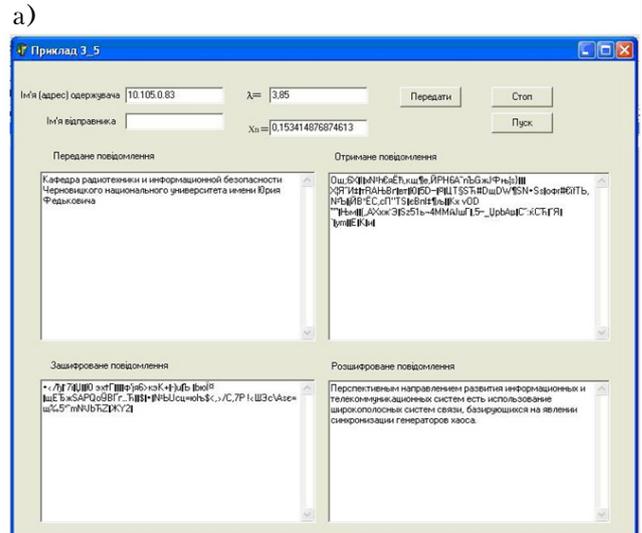


Рис. 4. Пример обмена сообщениями между пользователями А (а) и В (б) системы

лем А), а в дальнейшем в окне программы выводится текущее значение x_n . Аналогично пользователь В может передавать зашифрованные сообщения пользователю А (рис. 4, б).

Работа программы тестировалась на передаче текстов различной длины. При передаче текстовых сообщений длиной до 10000 символов в онлайн-режиме в условиях устойчивой синхронизации между передающей и принимающей сторонами наблюдалось точное воспроизведение переданной информации.

С целью установки условий шифрования, при которых зашифрованные информационные последовательности обладают свойствами псевдослучайных последовательностей, производилось их тестирование тестами NIST STS. Результаты приведены в таблице.

В результате тестирования было установлено, что при $\lambda = 3,85$ последовательности обладают

Результаты прохождения тестов NIST STS

Название теста	Значение p-value	Прохождение, %
Частотный побитовый тест	0,345	99
Частотный блочный тест	0,297	96
Тест на последовательность одинаковых битов	0,654	97,2
Тест на самую длинную последовательность единиц в блоке	0,612	99
Тест рангов бинарных матриц	0,732	98
Спектральный тест	0,512	98
Тест на совпадение неперекрывающихся шаблонов	0,432	98,5
Тест на совпадение перекрывающихся шаблонов	0,371	97,5
Универсальный статистический тест Маурера	0,052	98
Тест на основе сжатия Лемпеля – Зива	0,299	97
Тест на линейную сложность	0,377	97,3
Тест приближительной энтропии	0,342	98,1
Тест кумулятивных сумм	0,099	96
Тест на произвольные отклонения	0,645	99
Другой тест на произвольные отклонения	0,034	99
Тест на периодичность	0,087	97

свойствами псевдослучайных последовательностей и, следовательно, являются криптостойкими.

Заключение

Таким образом, предложена система передачи информации с шифрованием хаотическими последовательностями, генерированными в соответствии с логистическим уравнением $x_{n+1} = \lambda x_n(1-x_n)$ при $\lambda = 3,65 - 3,95$. Синхронизация системы передачи информации обеспечивается путем передачи по каналу связи через определенные интервалы времени текущего значения x_n , генерируемого логистическим отображением. Период передачи x_n зависит от быстродействия компьютера и расстояния между абонентами системы. При этом имеет место безошибочное воспроизведение текстовой информации на приемной стороне. Криптостойкость системы обуславливается количеством ключей шифрования, которое в данном случае было равно 10^{20} , что является достаточно хорошим результатом для двухпараметрической системы. Криптостойкость системы подтверждена результатами статистических тестов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. — Москва: Издательство физико-математической литературы, 2002.
2. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. — Москва: Постмаркет, 2000.
3. Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // Успехи физических наук. — 2009. — Т. 179, № 12. — С. 1281–1310.
4. Стасев Ю. В., Васюта К. С., Женжера С. В. Інформаційні системи на основі динамічного хаосу // Системи озброєння і військова техніка. — 2009. — № 1 (17). — С. 134–138.

5. Савельев С. В. Счетное множество бинарных последовательностей для широкополосных систем связи на основе системы с динамическим хаосом // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». — ИРЭ РАН, 2009. — С. 488–493.

6. Політанський Р. Л., Шпатар П. М., Гресь О. В., Ляшкевич В. Я. Шифрування інформації з використанням псевдовипадкових гаусових послідовностей // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 6/11 (60). — С. 8–10.

7. Andreyev Yu. V., Dmitriev A. S., Kuminov D. A., Starkov S. O. CDMA communications using maps with stored information // European Conference on Circuit Theory and Design. — Budapest. — 1997. — P. 324–329.

8. Політанський Р. Л., Політанський Л. Ф., Гресь О. В., Галюк С. Д. Система передавання даних з використанням генераторів хаосу // Всеукраїнський міжведомствений науково-технічний збірник «Радиотехніка». — 2011. — № 164. — С. 66–71.

9. Політанський Л. Ф., Кушнір М. Я., Політанський Р. Л., Еліяшів О. М., Невельський О. О., Величко С. В. Багатокористувальницька система зв'язку з використанням хаотичної частотної модуляції // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2010. — № 1/5 (43). — С. 44–47.

10. Політанський Р. Л., Політанський Л. Ф., Шпатар П. М., Іванюк П. В. Кодування каналу передавання даних, шифрованих псевдовипадковими послідовностями // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2013. — № 1/9(61). — С. 61–64.

11. Элияшев О. М., Галюк С. Д., Политанский Л. Ф., Кушнір Н. Я., Танасюк В. С. Непрерывная и импульсная синхронизация работы генераторов Чуа // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 1. — С. 22–26.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 05.08 2013 г.*

Р. Л. ПОЛІТАНСЬКИЙ, П. М. ШПАТАР, О. В. ГРЕСЬ, А. Д. ВЕРИГА
 Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
 E-mail: alexgs85@ukr.net

СИСТЕМА ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ З ШИФРУВАННЯМ ХАОТИЧНИМИ ПОСЛІДОВНОСТЯМИ

У статті представлено реалізацію системи передавання даних з шифруванням послідовностями, генерування яких здійснюється на основі одновимірних дискретних хаотичних відображень із забезпеченням синхронізації передавальної і приймальної сторін системи. Роботу системи продемонстровано на прикладі передавання інформації між користувачами.

Ключові слова: хаотична послідовність, початкові умови, логістичне відображення, синхронізація.

DOI: 10.15222/ТКЕА2014.2-3.28
 UDC 621.391

R. L. POLITANS'KYY, P. M. SHPATAR,
 A. V. HRES, A. D. VERIGHA
 Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
 E-mail: alexgs85@ukr.net

DATA TRANSMISSION SYSTEM WITH ENCRYPTION BY CHAOTIC SEQUENCES

Protection of transferable information in the telecommunication systems is possible by its imposition of coding sequence on a plaintext. Encryption of pseudorandom sequences can be performed by using generation algorithms which are implemented on the basis of the phenomenon of dynamical chaos, which is sensitive to changes in the initial conditions. One of the major problems encountered in the construction of secure communication systems is to provide synchronization between the receiving and transmitting parties of communication systems. Improvement of methods of hidden data transfer based on the systems with chaotic synchronization is the important task of research in the field of information and telecommunication systems based on chaos.

This article shows an implementation of a data transmission system, encrypted by sequences, generated on the basis of one-dimensional discrete chaotic maps with ensuring synchronization of the transmitting and receiving sides of the system. In this system realization of synchronization is offered by a transmission through certain time domains of current value of x_n generated by a logistic reflection. X_n transmission period depends on computer speed and distance between subscribers of the system. Its value is determined by transmitting a test message before the session. Infallible reception of test message indicates the optimal choice of a transmission period of the current value of x_n . Selection period is done at the program level. For the construction of communication network modern software was used, in particular programming language Delphi 7.0. The work of the system is shown on the example of information transmission between the users of the system. The system operates in real time full duplex mode at any hardware implementation of Internet access. It is enough for the users of the system to specify IP address only.

Keywords: chaotic sequence, initial conditions, logistic map, synchronization.

REFERENCES

1. Dmitriev A.S., Panas. A.I. *Dinamicheskii khaos: novye nositeli informatsii dlya sistem svyazi* [Dynamical chaos: new media for communication systems]. Moscow, Publishing physical and mathematical literature, 2002, 252 p.
2. Kronover P.M. *Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh. Osnovy teorii*. [Fractals and chaos in dynamical systems. Fundamentals of the theory]. Moscow, Postmarket, 2000, 350 p.
3. Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Khranov A. E. [On the use of chaotic synchronization for secure communication]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2009, vol. 179, no 12, pp. 1281-1310. (in Russian)
4. Stasyev Yu. V., Vasyuta K. S., Zhenzhera S. V. [Information systems based on dynamic chaos]. *Sistemi ozbrojeniya i vis'kova tekhnika*, 2009, no 1 (17), pp. 134-138. (in Ukrainian)
5. Saveliev S.V. Countable set of binary sequences for broadband communication systems based on a system with dynamic chaos. *Proc. of the III Russian Conference «Radar and radio» IRE-2009*, pp. 488-493. (in Russian)
6. Politans'kyi R.L., Shpatar P.M., Gres A.V., Liashkevych V.Ya. [Information encryption using pseudorandom gaussian sequences]. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovikh tekhnologii*, 2012, no 6/11 (60), pp. 8-10. (in Ukrainian)
7. Andreyev Yu. V., Dmitriev A. S., Kuminov D. A., Starkov S. O. CDMA communications using maps with stored information. *European Conference on Circuit Theory and Design*, Budapest, 1997, pp. 324-329.
8. Politans'kii R.L., Politans'kii L.F., Gres' O.V., Galyuk S.D. [Data transmission system using chaos generators]. *Vseukrainskii mezhdomstvennyi nauchno-tekhnicheskii sbornik «Radiotekhnika»*, 2011, no 164, pp. 66-71. (in Ukrainian)
9. Politans'kyi L.F., Kushnir M.Ya., Politans'kyi R.L., Eliyashiv O.M., Nevel'sky O.O., Velichko S.V. [The multiuser communication system with use of chaotic frequency modulation] *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovikh tekhnologii*, 2010, no 1/5 (43), pp. 44-47. (in Ukrainian)
10. Politans'kyi R.L., Politans'kyi L.F., Shpatar P.M., Ivaniuk P.V. [Coding of channel of data transmission encrypted by pseudo-random sequences]. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovikh tekhnologii*, 2013, № 1/9 (61), pp. 61-64. (in Ukrainian)
11. Eliyashiv O.M., Galyuk S.D., Politans'kii L.F., Kushnir N.Ya., Tanasyuk V.S. [Continuous and pulse synchronization of generators Chua] *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2012, no 1, pp. 22-26. (in Russian)

Д. т. н. В. Н. СИДОРЕЦ, к. т. н. А. И. БУШМА, к. т. н. А. М. ЖЕРНОСЕКОВ

Украина, г. Киев, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

E-mail: sidvn@ua.fm

СХЕМОТЕХНИКА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ С ХАОТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ ТОКА

Предложены схемы приставок к существующим источникам питания для создания импульсных хаотических колебаний тока сварочной дуги. Разработка схемных решений базировалась на результатах проведенных ранее исследований детерминированного хаоса в RLC -цепях с электрической дугой. Обсуждены преимущества и недостатки различных цепей с целью выбора схем приставок для практической реализации.

Ключевые слова: электрическая дуга, хаотические колебания, импульсно-дуговая сварка, схемотехника, источник питания.

Явление детерминированного хаоса [1–3] в нелинейных системах, обнаруженное несколько десятилетий назад, заинтересовало исследователей в первую очередь своими фундаментальными аспектами. Достаточно упомянуть об универсальной константе Фейгенбаума [3], которой характеризуется переход к детерминированному хаосу в нелинейных системах различной природы: механической, физической, химической, биологической, экологической и др. В последнее время наблюдается изменение направления исследований с фундаментального на прикладное. В качестве примера можно отметить разработки принципиально новых устройств защиты информации, хаотической радиолокации [4], устройств для диагностики патологий сердца [5].

Развитие наших исследований шло тем же путем. Детерминированный хаос был обнаружен в электрических цепях (рис. 1) со сварочной дугой [6], и были исследованы его фундаментальные свойства. Среди полученных результатов хотелось бы отметить проверку критериев детерминированного хаоса для RLC -цепей с дугой, выявление универсальных структур бифуркационных диаграмм и складчатой структуры периодических решений, определение функции отображения и фрактальной размерности аттрактора [7]. Бифуркационная диаграмма (рис. 2, внизу) демонстрирует, что при значениях параметра C , больших 3,039 ($R=15$, $L=1$, параметры R , L , C безразмерные), в цепи (рис. 1, а) возникают хаотические колебания. Положительность одного из показателей Ляпунова Λ (см. рис. 2, вверху), который является количественным критерием детерминированного хаоса, доказывает, что это действительно детерминированный хаос, а его образ в фазовом пространстве называется странным аттрактором.

Авторами были показаны технологические преимущества импульсных автоколебаний в цепях с лазерно-дуговым разрядом применительно к сварочным процессам [8, 9]. Объясняется это повышением давления плазменного столба на жидкий металл сварочной ванны (по сравнению с постоянным током), что приводит к увеличению ее глубины и, тем самым, к увеличению проплавления. Прямым следствием увеличения проплавления является увеличение производительности сварочного процесса. Есть основания считать, что применение хаотических колебаний также даст положительный эффект.

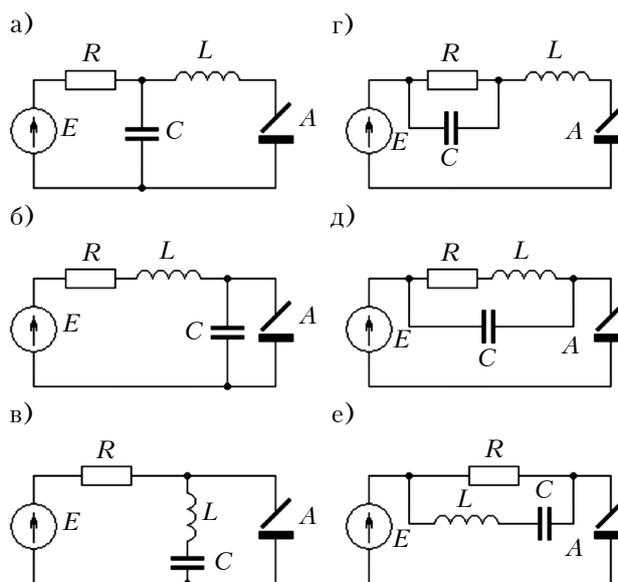


Рис. 1. Электрические цепи с дугой, в которых возможно возникновение хаотических колебаний тока

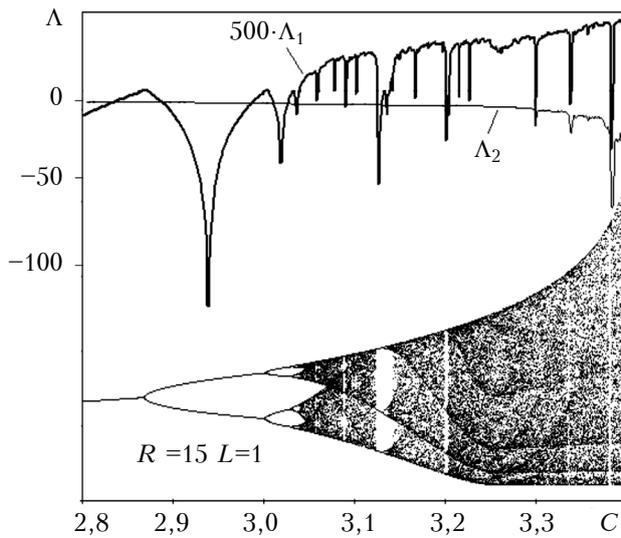


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма и показатели Ляпунова [7]

Подтвердить это предположение могут только экспериментальные исследования, для проведения которых необходимо создать специализированные источники питания с хаотическими колебаниями тока. Выбор рациональных схемотехнических решений для этих источников питания и обоснование такого выбора было целью данной работы.

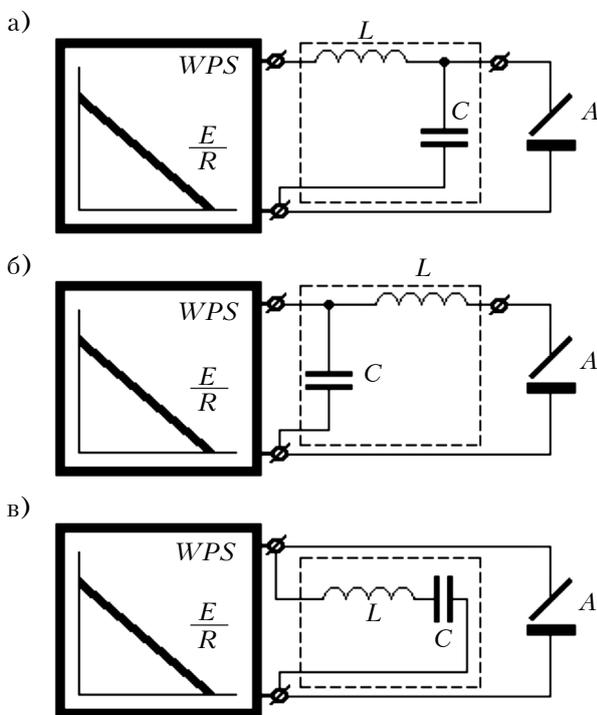


Рис. 3. Схемы приставок для создания периодических и хаотических колебаний тока и их подключение к сварочному источнику питания и дуге

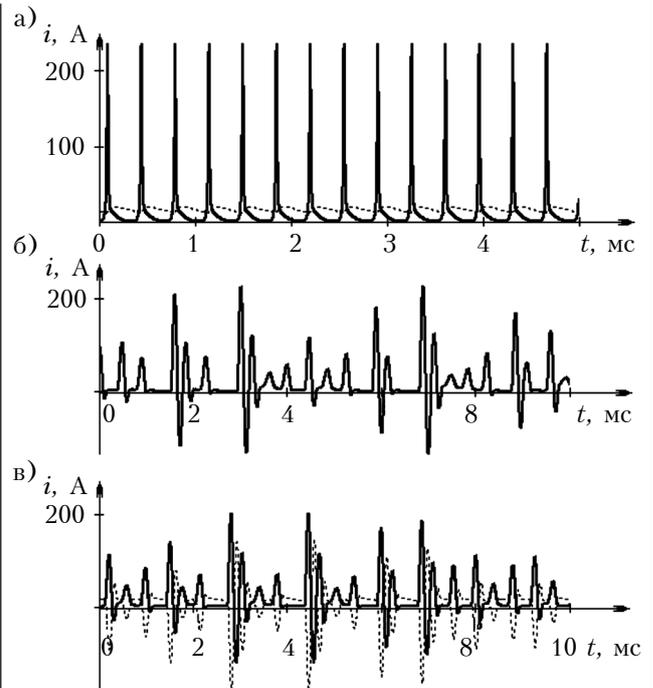


Рис. 4. Кривые тока дуги (сплошная) и тока реактора (пунктир), сформированные приставками к сварочным источникам постоянного тока

Решить поставленную задачу можно двумя путями: разработать специализированный источник питания или же разработать приставки к уже существующим источникам питания. Несмотря на всю перспективность первого пути, убедительным аргументом в пользу второго является наличие в промышленности огромного количества сварочных источников питания постоянного тока как традиционных, так и инверторных, функциональные возможности которых могут быть расширены без затрат больших средств путем применения разработанных приставок. Поэтому нами было решено идти вторым, что оправдано еще и сложившейся экономической ситуацией.

Ранее было установлено, что в шести RLC -цепях с дугой (см. рис. 1) возможно возникновение хаотических колебаний [10]. Очевидно, что в качестве приставки, схемы, представленные на рис. 1, не могут быть использованы, т. к. балластный резистор R в современных источниках питания не применяется, а наклон внешней характеристики источника реализуется управлением силовыми электронными ключами с использованием сигналов обратных связей. На рис. 3 изображены схемы приставок (выделены пунктирной линией) к сварочным источникам питания постоянного тока WPS.

В цепи, изображенной на рис. 3, а, могут возникать периодические автоколебания и хаотические (см. рис. 4, а), мало отличающиеся от периодических. Именно поэтому, по нашему мнению, эта цепь малоперспективна в качестве приставки для получения же хаотических колебаний

тока дуги. Для получения периодических релаксационных колебаний тока дуги, которые можно применить в процессе импульсно-дуговой сварки, эта цепь вполне пригодна. Так как импульсное воздействие тока осуществляется за счет разряда конденсатора непосредственно на дугу, действующее значение тока реактора $i(t)$ мало отличается от номинального тока источника питания. Этим объясняются малая масса реактора в этой приставке. К ее недостаткам можно отнести возможность полного разряда конденсатора при коротком замыкании дугового промежутка, что снижает стабильность процесса сварки.

В цепях, изображенных на рис. 3, б, в, могут возникать как периодические, так и хаотические автоколебания (рис. 4, б, в), причем последние значительно отличаются от периодических (рис. 4, а). Странные аттракторы, наблюдаемые в этих цепях, могут быть как ленточными, так и винтовыми. В режиме винтового странного аттрактора наблюдаются разнополярные колебания тока, что является непременным условием для сварки алюминия и его сплавов. Электрические и технологические возможности этих двух цепей одинаковы, но оценка массогабаритных показателей показывает небольшое преимущество цепи, изображенной на рис. 3, в, поскольку не весь сварочный ток (сплошная линия на рис. 4, в) протекает по ее реактору, а только его часть (пунктирная линия). Оценки показывают, что разность этих токов составляет не менее 10%. Конструктивным преимуществом приставки, изображенной на рис. 3, в, является отсутствие необходимости отсоединения дугового промежутка от клемм источника питания, что положительно влияет на оперативность ее подключения.

Предложенные приставки можно использовать для процесса импульсно-дуговой сварки.

Схему цепи, в которой последовательный LC-контур подключен параллельно как дуге, так и источнику питания, необходимо использовать при разработке приставки к существующим источникам питания для создания хаотических колебаний тока. Эту приставку в режиме винтового странного аттрактора, когда осуществляются разнополярные колебания тока, перспективно применять для сварки алюминия и его сплавов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. Детерминистский подход к турбулентности. — Москва: Мир, 1991.
2. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров. — Москва: Мир, 1990.
3. Шустер Г. Детерминированный хаос. — Москва: Мир, 1988.
4. Дмитриев А.С., Кислов В.Я. Стохастические колебания в радиопериферии и электронике. — Москва: Наука, 1989.
5. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. — Москва: Наука, 1990.
6. Сидорец В.Н., Пентегов И.В. Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013.
7. Сидорец В.Н. Критерии детерминированного хаоса в нелинейных цепях с электрической дугой // Технічна електродинаміка. — 2009. — № 2. — С. 29–35.
8. Бушма А.И., Жерносеков А.М. Автоколебания в цепи с лазерно-дуговым разрядом как основа новых импульсных технологий // Технічна електродинаміка. — 2012. — № 2. — С. 103–104.
9. Бушма А.И., Сидорец В.Н. Технологические характеристики колебательного лазерно-дугового разряда // Вісник Чернігівського держ. технол. ун-ту. Серія «Технічні науки». — 2012. — № 2. — С. 96–100.
10. Sydorets V. The bifurcations and chaotic oscillations in electric circuits with arc // Modelling Dynamics in Processes and Systems. Studies in Computational Intelligence. — Vol. 180. — Berlin: Springer, 2009. — P. 29–42.

Дата поступления рукописи
в редакцию 19.12 2013 г.

В. М. СИДОРЕЦЬ, О. І. БУШМА, А. М. ЖЕРНОСЕКОВ

Україна, м. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України
E-mail: sidvn@ua.fm

СХЕМОТЕХНІКА ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ З ХАОТИЧНИМИ КОЛИВАННЯМИ СТРУМУ

Запропоновано схеми приставок до існуючих джерел живлення для створення імпульсних хаотичних коливань струму зварювальної дуги. Розробка схемних рішень базувалася на результатах проведених раніше досліджень детермінованого хаосу в RLC-колах з електричною дугою. Обговорено переваги і недоліки різних кіл з метою вибору схем приставок для практичної реалізації.

Ключові слова: електрична дуга, хаотичні коливання, імпульсно-дугове зварювання, схемотехніка, джерело живлення.

CIRCUITRY OF POWER SUPPLIES FOR PULSED ARC WELDING
WITH CHAOTIC CURRENT OSCILLATIONS

Phenomenon of deterministic chaos in nonlinear systems is of interest to researchers first of all for its fundamental aspects. Recently the tendency has changed from fundamental to applied research.

Deterministic chaos was found in electrical circuits with a welding arc and its fundamental properties were investigated. The technological advantages of pulsed oscillations in circuits with laser-arc discharge over welding processes were shown earlier. The authors have reason to believe that the application of chaotic oscillations also has a positive effect. Only experimental studies can confirm this assumption. The purpose of this work is to develop promising circuit solutions for specialized power supply with current chaotic oscillations.

Application of set-top boxes to the existing power sources to create chaotic oscillations of pulsed current arc has been proposed. The development of circuit design has been based on the results of previous studies of deterministic chaos in RLC-circuits with electric arc. The advantages and disadvantages of various circuits have been discussed in order to select schemes of set-top boxes for the practical implementation.

Keywords: electric arc, chaotic oscillations, pulsed arc welding, circuitry, power supply.

REFERENCES

1. Berge P., Pomeau Y., Vidal Ch. *L'Ordre dans le chaos. Vers une approche deterministe de la turbulence*. Paris, Hermann, 1985, 353p.
2. Moon F.C. *Chaotic vibration: an introduction for applied scientists and engineers*. New York, John Wiley&Sons, 1987, 309 p.
3. Schuster H.-G. *Deterministic chaos*. Weinheim: Physik-Verlag, 1984, 220 p.
4. Dmitriev A.S., Kislov V.Ya. *Stokhasticheskie kolebaniya v radiofizike i elektronike* [Stochastic oscillations in radio physics and electronics]. Moscow, Nauka, 1989, 280 p. (in Russian)
5. Loskutov A.Yu., Mikhailov A.S. *Vvedenie v sinergetiku* [Introduction to Synergetics]. Moscow, Nauka, 1990, 272 p. (in Russian)
6. Sidorets V.N., Pentegov I.V. *Determinirovannyi khaos v nelineinykh tsepyakh s elektricheskoi dugo* [Deterministic chaos in nonlinear circuits with electrical arc]. Kiev, International Association «Welding», 2013, 272 p. (in Russian)
7. Sidorets V.N. [Criteria of deterministic chaos in nonlinear circuits with an electric arc]. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2009, no 2, pp. 29-35 (in Russian)
8. Bushma A.I., Zhernosiekov A.M. [Self-oscillations in a circuit with a laser-arc discharge as the basis of new pulse technologies]. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2012, no 2, pp.103-104 (in Russian)
9. Bushma A.I., Sydorets V.N. [Technological characteristics the oscillatory laser-arc discharge]. *Visnik Chernivts'kogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya „Tekhnichni nauki”*, 2012, no 2(57), pp. 96-100 (in Russian)
10. Sydorets V. The bifurcations and chaotic oscillations in electric circuits with arc. *Modelling Dynamics in Processes and Systems. Studies in Computational Intelligence*, vol. 180, Berlin, Springer, 2009, pp. 29-42.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Богуш М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. — Москва: Техносфера, 2013.

Книга посвящена проектированию пьезоэлектрических датчиков с использованием современных методов математического моделирования. Описаны критерии, алгоритмы и процедуры для рационального и целенаправленного выбора конструкции датчика, материалов и размеров деталей с помощью универсальных относительно геометрии изделия и способов приложения нагрузки численных пространственных электротермоупругих моделей. Это позволяет улучшить технические характеристики пьезоэлектрических датчиков за счет обоснованного выбора компромисса между информативностью и надежностью изделия в предполагаемых условиях эксплуатации. Эффективность предложенных методов подтверждается разработкой серии пьезоэлектрических датчиков с уникальными свойствами, нашедших широкое применение в вихревых и ультразвуковых расходомерах жидкости, газа и пара для систем промышленной автоматизации, которые широко применяются в промышленности.

Предназначена для специалистов, занимающихся проектированием и применением пьезоэлектрических преобразователей и датчиков в измерительных и управляющих системах, а также аспирантов и студентов технических вузов.



К. т. н. А. Н. ГЕРШУНИ, к. т. н. А. П. НИЦИК

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: politekhins@gmail.com

КОАКСИАЛЬНАЯ ТЕПЛОВАЯ ТРУБА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЯ ЛАЗЕРА

Описаны результаты разработки и исследования коаксиальной тепловой трубы для охлаждения отражателя твердотельного лазера. Показано, что система охлаждения, функционирующая по испарительно-конденсационному принципу, позволяет обеспечить равномерность температуры охлаждаемой поверхности при низком термическом сопротивлении 0,03 К/Вт.

Ключевые слова: отражатель лазера, система охлаждения, коаксиальная тепловая труба.

Широкое применение твердотельных оптических квантовых генераторов (ОКГ), или лазеров, вызвало необходимость интенсивного отвода теплоты от нагретых частей приборов. Использование жидкостных теплоносителей четырех поколений (вода и составы на ее основе; этиленгликолевые растворы, спиртооктановые и фосфорорганические жидкости; кремнийорганические и фторорганические жидкости, эфиры угольной кислоты; теплоносители на основе кремнийорганических жидкостей и эфиров угольной кислоты) привело к улучшению характеристик ОКГ [1–4]. В то же время системы водяного (жидкостного) охлаждения часто рассматриваются как неудобные при практическом использовании вследствие существенных их недостатков [5]. Достоинства контактного способа охлаждения элементов ОКГ заключаются в возможности пространственного разделения источника и стока теплоты, в принципиальной возможности развития поверхности охлаждения вне зоны тепловыделения, в повышении безопасности и надежности из-за отсутствия жидкости в рабочей зоне прибора и отказа от подвижных деталей и разъемных соединений в системе охлаждения [6–10], что характерно для жидкостных систем. К недостаткам контактного способа охлаждения относятся неравномерность температуры поверхности охлаждаемых элементов, большое термическое сопротивление теплопроводов, дополнительное увеличение массы и габаритов из-за наличия монолитных металлических теплопроводов.

Анализ особенностей работы ОКГ и возможностей известных способов их охлаждения, включая конвективный (газовый и жидкостной) и контактный (кондуктивный), а также их комбинации, показывает, что требуемые тепловые режимы данных приборов могут быть обеспече-

ны эффективными теплопередающими устройствами – тепловыми трубами (ТТ). Работают они по испарительно-конденсационному принципу [11, 12], что дает возможность сохранить положительные свойства контактного способа при одновременном устранении ряда его существенных недостатков. Применение ТТ позволяет значительно уменьшить термическое сопротивление тепловода за счет большей (в сотни раз) эквивалентной теплопроводности ТТ по сравнению с лучшими монолитными теплопроводными материалами, значительно увеличить отводимые тепловые нагрузки при малых перепадах температуры, повысить степень изотермичности охлаждаемой поверхности и надежность работы системы обеспечения теплового режима. При меньшей массе и соизмеримых размерах ТТ способны отводить тепла в десятки, а иногда и в сотни раз больше, чем любые металлические теплопроводы [13].

Рациональное решение трех взаимосвязанных задач в случае применения ТТ для обеспечения требуемых тепловых режимов лазеров, а именно: внутренней (охлаждение элементов прибора), транспортной (передача теплоты внутри системы охлаждения и к системе теплосброса) и внешней (обеспечение теплообмена между системой охлаждения и внешней средой) [11, 14], позволяет в итоге повысить энергию излучения и частоту повторения импульсов. Появляется также возможность разработки на данной элементной базе систем обеспечения теплового режима пассивного типа.

Статья посвящена описанию конструкции разработанной тепловой трубы, способной обеспечить температуру теплоотдающей поверхности отражателя лазера не более 120°C при его работе в импульсном режиме. Такое теплопередающее устройство испарительно-конденсационного

типа должно функционировать при любой ориентации в пространстве в условиях теплосъема путем вынужденной конвекции воздуха при его температуре до 60°C.

Конструкция тепловой трубы

Разработанная цилиндрическая коаксиальная тепловая труба (рис. 1) состоит из внутренней оболочки с коническим отверстием и внешней оболочки-радиатора с цельноточеными ребрами. Средняя температура стенки в зоне нагрева для данной конструкции должна отвечать условию $\bar{t}_{ст}^H \leq 120^\circ\text{C}$ ($\bar{t}_{ст}^H = (t_1 + t_2) / 2$, где t_1 и t_2 — значения температуры, измеряемые термопарами Т1 и Т2 на рис. 1). Размеры радиатора, а также конструктивные параметры оребрения определены для самых неблагоприятных условий: скорость воздуха в «живом» сечении радиатора 3 м/с, соответствующее этой скорости ориентировочное значение коэффициента внешней теплоотдачи $\alpha = 25 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$, тепловой поток $Q = 300 \text{ Вт}$ подводится в двух режимах: в импульсном (реальный режим) и в непрерывном. Поверхность оребрения площадью $F_p = 0,16 \text{ м}^2$ выполнена в виде 116 кольцевых ребер высотой $h_p = 5 \text{ мм}$, толщиной $\delta_p = 0,5 - 0,6 \text{ мм}$, размещенных с шагом 1,75 мм. Материал оболочки тепловой трубы (медь) и теплоноситель (вода) выбраны из требований совместимости, высокой прочности при рабочей температуре, наибольших значений теплопроводности компонентов и параметра N рабочей жидкости ($N = \rho_{ж} \sigma r / \mu_{ж}$, где $\rho_{ж}$ — плотность, σ — коэффициент поверхностного натяжения, r — теплота парообразования, $\mu_{ж}$ — динамический коэффициент вязкости рабочей жидкости).

К наружной цилиндрической поверхности внутренней оболочки методом диффузионной сварки припечен пористый материал — капиллярная структура. С целью упрощения технологии изготовления ТТ, а также интенсификации процессов теплообмена в ее зоне конденсации, внутренняя поверхность оболочки-радиатора выполнена гладкой. Между капиллярной структурой и оболочкой-радиатором установлен пористый материал в виде артерии, которая предназначена для подачи конденсата, стекающе-

го в нижнюю часть оболочки-радиатора, в зону нагрева ТТ. Капиллярная структура и артерия изготовлены из медных монодисперсных дискретных волокон диаметром $d_b = 50 \text{ мкм}$, длиной $l_b = 3 \text{ мм}$. Пористость (87%), толщина капиллярной структуры ($\delta_{кc} = 0,5 \text{ мм}$) и толщина артерии ($\delta_a = 1 \text{ мм}$) определены с учетом рекомендаций по оптимизации параметров капиллярной структуры при горизонтальной работе ТТ [15]. Капиллярно-пористая структура ТТ заполнена теплоносителем с образованием небольшого избытка в зоне контакта артерии с внутренней поверхностью радиатора. Масса ТТ составляет 0,94 кг.

Технология изготовления ТТ включала в себя следующие этапы:

- изготовление оболочек и доннышек;
- войлокование и спекание пористого материала, припекание капиллярной структуры к внешней поверхности внутренней оболочки, а артерии — к капиллярной структуре и к внутренней поверхности оболочки-радиатора;
- сборка и термическая обработка капиллярной структуры и артерии;
- выполнение неразъемного соединения доннышек с внутренней и внешней оболочками пайкой твердым припоем или сваркой;
- проверка тепловой трубы на герметичность и ее дегазация в вакууме;
- вакуумирование, заполнение теплоносителем и герметизация.

Результаты исследования и их анализ

Экспериментальное исследование проводилось на установке, основным элементом которой являлась тепловая труба с омическим нагревателем внутри, представляющим собой стальной стержень диаметром 15 мм, покрытый электроизоляционным слоем, с равномерно навитой нихромовой проволокой на длине 70 мм. Снаружи нагреватель покрыт слюдой и с тугой посадкой установлен в медный имитатор конического отражателя. Уменьшение термического сопротивления между имитатором и оболочкой тепловой трубы достигалось при помощи теплопроводной пасты. Тепловой поток, передаваемый ТТ, измерялся ваттметром класса 0,1. Изменение

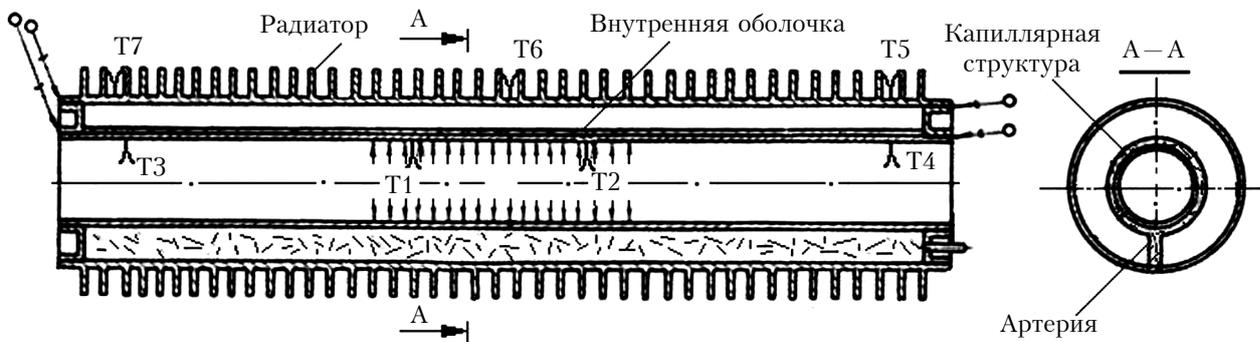


Рис. 1. Конструкция цилиндрической коаксиальной тепловой трубы

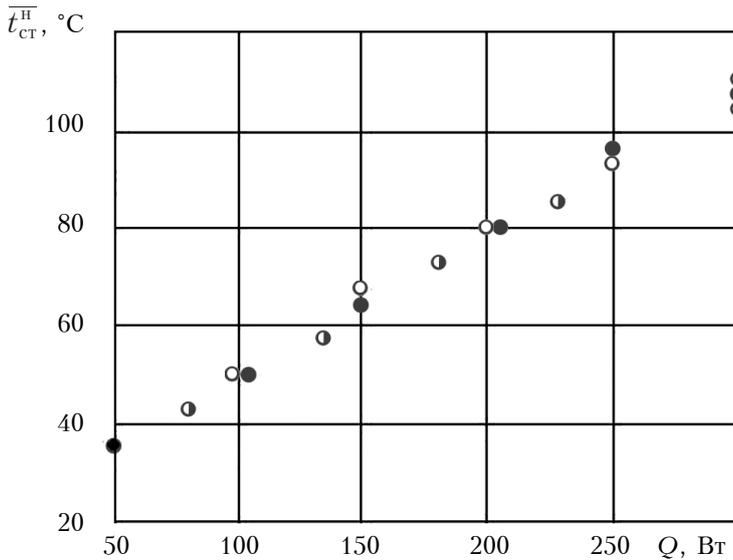


Рис. 2. Зависимость средней температуры стенки в зоне нагрева цилиндрической коаксиальной ТТ от передаваемого теплового потока при различной ее ориентации:

○ — φ=0°; ● — φ=30°; ● — φ=90°

подводимого теплового потока осуществлялось при помощи регулятора напряжения, подключенного к однофазной сети (220 В, 50 Гц) через стабилизатор напряжения. Температура ТТ измерялась в семи точках: четыре точки на внутренней поверхности и три на внешней (см. рис. 1) при помощи медь-константановых термопар, переключателя и цифрового вольтметра. Термопары Т1 и Т2 крепились на расстоянии 15 мм от соответствующих торцов имитатора. Холодные спаи термопар размещались в сосуде с тающим льдом. Тепловая труба обдувалась вентилятором (скорость охлаждающе-

го воздуха около 3 м/с, температура 22°С, α≈25 Вт/(м²·К)).

Исследования проводились при вертикальной (угол наклона оси ТТ к горизонтальной плоскости φ=90°) и горизонтальной (φ=0°) ориентации ТТ, а также в наклонном положении (φ=30°). В опытах при φ≠90° тепловую трубу ориентировали таким образом, чтобы артерия находилась со стороны нижней образующей ТТ.

Зависимость средней температуры стенки тепловой трубы в зоне нагрева $\bar{t}_{ст}^H$ от непрерывно подводимого теплового потока представлена на рис. 2, где видно, что в исследованном диапазоне тепловых нагрузок она носит линейный характер. Отсутствие резкого изменения вида этой функциональной зависимости, характерного для наступления предела теплопередающей способности, свидетельствует о том, что мак-

симальный тепловой поток при любой ориентации ТТ превышает 300 Вт.

На рис. 3 представлены зависимости перепада температуры по тепловой трубе $\Delta\bar{t}_T$ от передаваемого теплового потока Q (а) и плотности теплового потока в зоне нагрева q_H (б). Перепад температуры по ТТ определялся как разность средних температур в зоне нагрева $\bar{t}_{ст}^H$ и в зоне конденсации $\bar{t}_{ст}^K$. В качестве $\bar{t}_{ст}^K$ принята температура в месте крепления термопары Т6, т. к. при наклонном положении трубы показания термопары Т5 (или же Т7) несколько занижены из-за

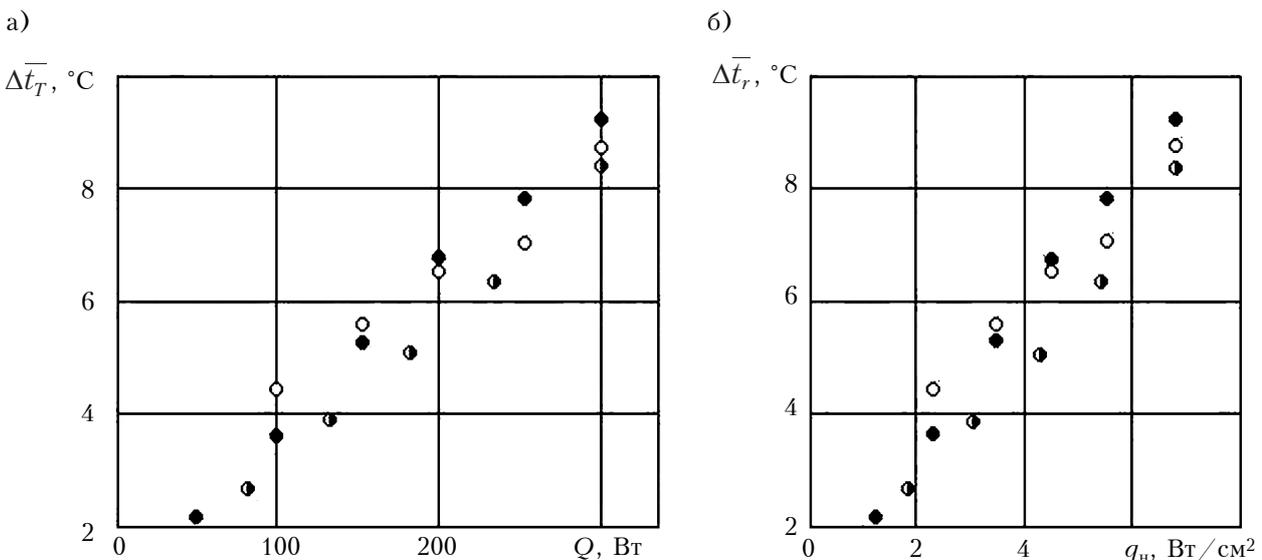


Рис. 3. Зависимость перепада температуры по цилиндрической коаксиальной ТТ от передаваемого теплового потока (а) и от плотности теплового потока в зоне нагрева (б) при различной ее ориентации:

○ — φ=0°; ● — φ=30°; ● — φ=90°

накопления избытка жидкости в нижней части ТТ. Как видно из рис. 3, перепад температуры $\Delta \bar{t}_T$ мало зависит от ориентации ТТ, и при $Q=300$ Вт ($q_n=7$ Вт/см²) $\Delta \bar{t}_T \approx 9^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что экспериментально полученные величины $\Delta \bar{t}_T$ завышены, т. к. термопары Т1 и Т2 зачеканивались в канавках, выполненных не в корпусе ТТ, а в медном имитаторе. Контакт термопар с внутренней оболочкой ТТ осуществлялся при прижимании имитатора к этой поверхности. Такой вынужденный способ размещения и крепления термопар привел к завышению значений $\bar{t}_{\text{ст}}^H$ и, соответственно, $\Delta \bar{t}_T$. Согласно расчету, действительный перепад температуры по ТТ составляет 4°C при $Q=300$ Вт, т. е. измеренное значение завышено на $4-5^\circ\text{C}$.

Полный перепад температуры при передаваемом тепловом потоке $Q=300$ Вт равен 87°C ($109-22$) и состоит в основном из перепада температуры между радиатором и охлаждающим воздухом $\Delta \bar{t}_{\text{охл}} = 78^\circ\text{C}$ ($100-22$).

На рис. 4 представлено изменение температуры стенки в зоне нагрева ТТ в переходном режиме при пуске от момента подачи тепловой нагрузки $Q=300$ Вт до достижения установившегося режима. При непрерывном теплоподводе продолжительность пуска τ_n составляет около 14 мин и температура устанавливается на уровне 109°C . При импульсном подводе теплового потока, когда в течение 10 с подается нагрузка 300 Вт, а в следующие 10 с тепловой поток не подводится, время выхода на установившийся режим не изменяется, амплитуда колебаний $\bar{t}_{\text{ст}}^H$ составляет около 4°C , а максимальное значение температуры стенки при установившемся режиме равно 66°C . Следует отметить, что уменьшение теплоемкости источника выделения тепла при замене имитатора реальным отражателем приведет к уменьшению времени выхода на установившийся режим.

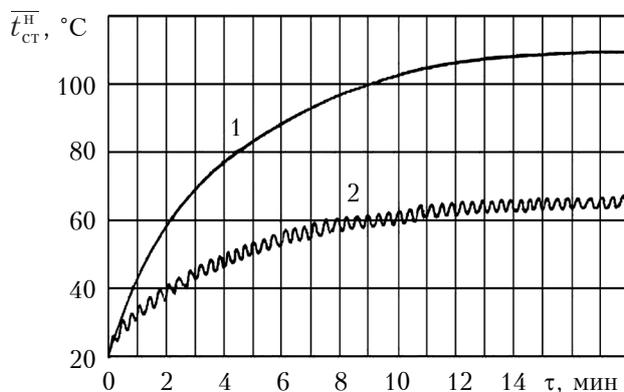


Рис. 4. Пусковые характеристики цилиндрической коаксиальной тепловой трубы ($Q=300$ Вт) при непрерывном (1) и импульсном (2) подводе тепла

При охлаждении ТТ потоком воздуха с температурой $t_{\text{охл}}=60^\circ\text{C}$ температура стенки в зоне нагрева при импульсном подводе теплового потока составляет $66+38=104^\circ\text{C}$ (в действительности же температура возрастет не на 38°C ($60-22$), а несколько меньше, т. к. с увеличением температурного уровня процессы теплообмена в ТТ интенсифицируются). Таким образом, условие $\bar{t}_{\text{ст}}^H \leq 120^\circ\text{C}$ выполняется даже при самых неблагоприятных условиях охлаждения.

Заключение

Исследования показали целесообразность использования систем охлаждения, функционирующих по испарительно-конденсационному принципу, для обеспечения теплового режима твердотельных оптических квантовых генераторов. Цилиндрическая тепловая труба коаксиального типа, разработанная для охлаждения отражателя лазера, при отводе тепла вынужденной конвекцией воздуха с температурой 60°C в импульсном режиме подвода теплового потока 300 Вт обеспечивает температуру теплоотдающей поверхности не более 120°C при любой ориентации в поле сил гравитации. Термическое сопротивление разработанной ТТ составляет $0,03$ К/Вт, удельное термическое сопротивление — $1,1 \cdot 10^{-3}$ м²·К/Вт.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Подгаецкий В. М., Волюнкин В. М., Комлев И. В., Резниченко А. В. Жидкостные теплоносители для лазеров // Прикладная физика. — 2003. — № 1. — С. 123–142.
2. Пат. 2097887 России. Устройство охлаждения лазера / В.В.Хомченко, Г. Н. Котаев. — 27.11.1997.
3. Пат. 2498467 России. Оптическая усилительная головка с диодной накачкой / Ю. Д. Арапов, А. А. Абышев, Н. В. Корепанов и др. — 10.11.2013.
4. Пат. 6747789 USA. Laser amplifying system / Martin Voss Huonker, Christian Schmitz. — 08.06.2004.
5. Кисель В., Гулевич А., Кондратюк Н. Иттербиевые твердотельные лазерные системы // Фотоника. — 2011. — Вып. 2. — С. 20–24.
6. Пат. 4199735 USA. Optical compensation for thermal lensing in conductively cooled laser rod / Curt H. Chadwick, Edward D. Reed. — 03.07.1978.
7. Пат. 4354272 USA. Solid crystal laser emission device with an improved external cooling circuit / Haus-Peter Schwob, Peter Soppelsa. — 14.07.1980.
8. Пат. 4429394 USA. Conduction cooled solid state laser / Steve Guch, Jr. — 09.11.1981.
9. Пат. 2197043 России. Импульсно-периодический лазер / О. Б. Сторожук, В. А. Беренберг, А. К. Фельк и др. — 20.01.2003.
10. Пат. 2202847 России. Импульсно-периодический лазер / О. Б. Сторожук, О. В. Сизов. — 20.04.2003.
11. Нищик А. П., Савина В. Н., Мохлай Н. В. Системы охлаждения оптических квантовых генераторов / Деп. УкрНДІНТІ 569-Ук87. — Киев, УкрНДІНТІ. — 1987.
12. Улитенко А. И. Принципы построения высокоэффективных систем охлаждения электронных приборов /

Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Рязанский государственный радиотехнический университет. — 2009.

13. Колпаков А. Охлаждение в системах высокой мощности // Силовая электроника. — 2010. — № 3. — С. 62 — 66.

14. Pat. 6768751 USA. Methods and apparatus for removing heat from a lasing medium of a solid-state laser assembly / Roy M. Hoar. — 27.07.2004.

15. Семена М. Г., Гершуни А. Н. Влияние параметров металловолоконистой капиллярной структуры на максимальную теплопередающую способность тепловых труб // Инженерно-физический журнал. — 1982. — Т. 43. — № 4. — С. 604 — 609.

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.09 2013 г.

О. Н. ГЕРШУНИ, О. П. НИЩИК

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут»
E-mail: politekhins@gmail.com

КОАКСІАЛЬНА ТЕПЛОВА ТРУБА ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ВІДБИВАЧА ЛАЗЕРА

Наведено результати розробки та дослідження коаксіальної теплової труби для охолодження відбивача твердотільного лазера. Система охолодження, яка функціонує за випарувально-конденсаційним принципом, дозволяє забезпечити рівномірність температури охолоджуваної поверхні при низькому термічному опорі.

Ключові слова: відбивач лазера, система охолодження, коаксіальна тепла труба.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2-3.37
UDC 621.3.032.42:621.378.8.038.825

A. N. GERSHUNI, A. P. NISHCHIK
Ukraine, NTUU “Kiev Polytechnic Institute”
E-mail: politekhins@gmail.com

COAXIAL HEAT PIPE FOR COOLING OF A LASER'S REFLECTOR

The paper presents the development and research results for a coaxial heat pipe designed for cooling of a reflector of a solid-state laser. A coaxial cylindrical heat pipe, designed to cool the laser reflector, provides that the temperature of the heat-removing surface does not exceed 120°C at any orientation in the gravitational field, if the heat is removed by forced convection of air with the temperature of 60°C in a pulsed mode of heat flow supply of 300 W. Thermal resistance of the developed heat pipe is 0,03 K/W, the specific thermal resistance — $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. The developed cooling system based on the evaporation-condensation principle, allows ensuring temperature uniformity of the cooling surface at low thermal resistance.

Keywords: reflector laser, cooling system, coaxial heat pipe.

REFERENCES

- Podgaetskii V.M., Volynkin V.M., Komlev I.V., Reznichenko A.V. [Liquid coolants for lasers]. *Prikladnaya fizika*, 2003, no 1, pp. 123-142 (in Russian)
- Khomchenko V.V., Kotaev G.N. *Ustroistvo okhlazhdeniya lazera* [Laser cooling device]. Patent 2097887 RF, Nov 27, 1997.
- Arapov Yu.D., Abyshev A.A., Korepanov N.V. et al. *Opticheskaya usilitel'naya golovka s diodnoi nakachkoi* [Amplifying optical head with a diode-pumping]. Patent 2498467 RF, Nov 10, 2013.
- Martin Voss Huonker, Christian Schmitz. *Laser amplifying system*. Patent 6747789 USA, Jun 08, 2004.
- Kisel V., Gulevitch A., Kondratuk N. [Solid state ytterbium laser systems]. *Fotonika*, 2011, iss. 2, pp. 20-24 (in Russian)
- Curt H. Chadwick, Edward D. Reed. *Optical compensation for thermal lensing in conductively cooled laser rod*. Patent 4199735 USA Jul 03, 1978.
- Haus-Peter Schwob, Peter Soppelsa. *Solid crystal laser emission device with an improved external cooling circuit*. Patent 4354272 USA, Jul 14, 1980.
- Steve Guch Jr. *Conduction cooled solid state laser*. Patent 4429394 USA, Nov 09, 1981.

- Storozhuk O.B., Berenberg V.A., Fel'k A.K. et al. *Impul'sno-periodicheskii lazer* [Repetitively pulsed laser]. Patent 2197043 RF, Jan 20, 2003.
- Storozhuk O.B., Sizov O.V. *Impul'sno-periodicheskii lazer* [Repetitively pulsed laser] Patent 2202847 RF, Apr 20, 2003.
- Nishchik A.P., Savina V.N., Mokhlai N.V. [Cooling system of lasers]. *Dep. UkrNDINTI 569-Uk87*, Kiev, UkrNDINTI, 1987 (in Russian)
- Ulitenko A.I. *Printsipy postroeniya vysokoeffektivnykh sistem okhlazhdeniya elektronnykh priborov* Diss. dokt. tekhn. nauk [Construction principles of high-performance cooling systems of electronic devices. Dr. tech. sci. diss.]. Ryazan State Radio Engineering University, 2009.
- Kolpakov A. [Cooling of high power systems] *Silovaya elektronika*, 2010, no 3, pp. 62- 66 (in Russian)
- Roy M. Hoar. *Methods and apparatus for removing heat from a lasing medium of a solid-state laser assembly*. Patent 6768751 USA, Jul 27, 2004.
- Semena M.G., Gershuni A.N. [Influence of parameters of metal-fibrous capillary structure for maximum heat transfer capacity of the heat pipes]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 1982, vol. 43, no 4, pp. 604-609 (in Russian)

А. Н. НАУМОВА, к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ, д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Киев, НТУУ «КПИ»

E-mail: yaya_2000@ukr.net, kravetz_kpi@ukr.net, yunikola@ukr.net

ФИЗИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И РАСЧЕТ НАЧАЛА КИПЕНИЯ В ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЕ

Получена формула для расчета теплового потока, обеспечивающего начало кипения теплоносителя в пульсационной тепловой трубе (ПТТ), т. е. определяющего нижнюю границу эффективной работы ПТТ. Показано, что основными факторами, влияющими на искомую величину теплового потока, являются движущий капиллярный напор и скорость движения парового пузырька. Формула для определения теплового потока была получена для замкнутых ПТТ, изготовленных из меди, с водой в качестве теплоносителя. Информация о величине теплового потока необходима для дальнейшего проектирования систем охлаждения различных теплонагруженных элементов, чувствительных к перегреву, например светодиодов перспективных осветительных устройств.

Ключевые слова: пульсационная тепловая труба, математическая модель, начало кипения, движущий капиллярный напор, светодиод.

На освещение в Украине расходуется около 25% всей потребляемой электроэнергии. Одним из путей энергосбережения в освещении является использование полупроводниковых источников света — светодиодов (СД), которые при излучении одинакового светового потока потребляют приблизительно в 10 раз меньше электроэнергии, чем лампы накаливания. Мощность так называемых ламп-ретрофитов, использующих в качестве источника света СД, обычно составляет 0,6–7 Вт [1, 2] и ограничивается возможностями системы отвода теплоты от применяемых СД. При недостаточной эффективности охлаждения повышается температура кристалла выше нормативного значения, вследствие чего происходит деградация СД [3], снижение светового потока и срока службы как самого СД, так и осветительного устройства в целом. В связи с этим при проектировании бытовых осветительных устройств с более мощными светодиодными источниками света одной из главных задач является поиск новых конструктивно-технологических решений, направленных на повышение эффективности отвода теплоты, выделяемой СД, снижение рабочей температуры кристалла СД. С этой целью можно использовать как фитильные, так и пульсационные тепловые трубы (ПТТ) — высокоэффективные теплопередающие устройства, которые используются в системах охлаждения на основе испарительно-конденсационного цикла [4, 5]. Вместе с тем, если процессы теплообмена в фитильных тепловых трубах уже в достаточной степени изучены, то вопросы моделирования тепловых процессов в ПТТ в настоящее время решены еще не в полной мере. Так, например, на данный момент существует нема-

ло попыток создать математические модели, которые описывали бы поведение парожидкостной смеси теплоносителя в ПТТ в зависимости от различных параметров [6–8]. Однако известные модели не позволяют теоретически определить тот тепловой поток, после подвода которого происходит наиболее эффективная теплоотдача в ПТТ, что наблюдалось в экспериментальных исследованиях [9].

Целью данной работы был поиск формулы для расчета величины теплового потока, необходимого для начала кипения теплоносителя и определяющего нижнюю границу эффективной работы ПТТ.

Физическая модель

Рассмотрим плоскую ПТТ, которая имеет зоны нагрева, транспорта и конденсации. Будем считать, что коэффициент заполнения теплоносителем равен 50%, что является оптимальным по мнению многих исследователей [10–12]. В таком случае площадь зоны нагрева, соприкасающейся с паровой фазой ($S_{\text{зн}}^{\text{п}}$), равна площади, соприкасающейся с жидкой фазой ($S_{\text{зн}}^{\text{ж}}$):

$$S_{\text{зн}}^{\text{п}} = S_{\text{зн}}^{\text{ж}} = S_{\text{зн}} / 2, \quad (1)$$

где $S_{\text{зн}}$ — общая площадь внутренней поверхности зоны нагрева.

Рассматриваемый процесс относится к зоне нагрева, поскольку именно там происходит зарождение и рост парового пузырька. Будем считать, что тепловой поток Q подводится ко всей площади внешней поверхности зоны нагрева равномерно. При этом если тепло подводится к части ПТТ, заполненной паровой фазой, то это

приводит к испарению тонкой пленки теплоносителя возле стенки и к увеличению объема паровой фазы. Если же тепло подводится к части ПТТ, заполненной жидкой фазой, то энергия аккумулируется, что впоследствии приводит к зарождению и росту парового пузырька (рис. 1).

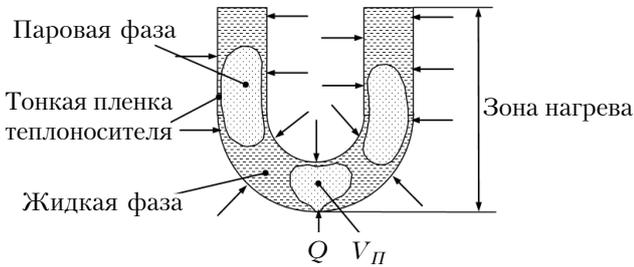


Рис. 1. Физическая модель зарождения и роста парового пузырька в зоне нагрева ПТТ (стрелками показан подвод тепла)

Как известно, ПТТ имеет два режима работы [9]: кондуктивный, когда перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности стенки, и пульсационный, который соответствует переносу теплового потока за счет кипения теплоносителя, причем для эффективного охлаждения представляет интерес только второй режим. Нам необходимо определить величину теплового потока, необходимого для начала кипения теплоносителя ($Q_{нк}$). Фактически, этот тепловой поток соответствует переходу от первого режима работы ПТТ ко второму.

Математическая модель

Для того чтобы составить математическую модель, примем ряд допущений:

- 1) пар находится в состоянии насыщения;
- 2) средняя температура парожидкостной смеси в зонах нагрева, транспорта и конденсации постоянна;
- 3) пар и жидкость равномерно распределены вдоль ПТТ;
- 4) теплофизические свойства жидкости и пара постоянны и не зависят от температуры.

Тепловой поток, который подводится к жидкой фазе теплоносителя в зоне нагрева, расходуется на зарождение и рост парового пузырька ($Q_{пп}$), а также на аккумуляцию энергии, необходимой для преодоления капиллярных сил и перемещения пузырька в зону конденсации ($Q_{пер}$). Таким образом, для начала кипения теплоносителя необходимо подвести следующий тепловой поток:

$$Q = Q_{пп} + Q_{пер} = c_p \frac{\Delta m''}{\Delta \tau} \Delta T + \Delta F \frac{dl_{пер}}{d\tau_{пер}}, \quad (3)$$

где c_p — коэффициент теплоемкости пара;
 $\Delta m''$ — прирост массы парового пузырька при подведении теплового потока в течение времени $\Delta \tau$;
 ΔT — температурный напор между стенкой трубы и теплоносителем;

ΔF — капиллярная сила, способствующая перемещению пузырька из зоны нагрева в зону конденсации;

$dl_{пер}$ — расстояние, на которое перемещается паровой пузырек за время $d\tau_{пер}$.

В этом выражении величины ΔF и $\frac{dl_{пер}}{d\tau_{пер}}$ значительно зависят от параметров среды, охлаждающей зону конденсации (расхода теплоносителя и температуры на входе в конденсатор), а также от ориентации ПТТ в пространстве. Величина $\frac{\Delta m''}{\Delta \tau}$ по сути представляет собой удельный расход пара, т. е. показывает с какой скоростью происходит переход жидкой фазы в паровую.

Масса парового пузырька — величина переменная, поскольку его объем $V_{п}$ постоянно изменяется во времени:

$$\frac{\Delta m''}{\Delta \tau} = \rho'' \frac{dV_{п}}{d\tau} = \rho'' \frac{d\left(\frac{4}{3}\pi R_{п}^3\right)}{d\tau} = \frac{4}{3}\rho''\pi \frac{dR_{п}^3}{d\tau}, \quad (4)$$

где ρ'' — плотность пара;

$R_{п}$ — эквивалентный радиус (радиус сферы, имеющей объем $V_{п}$).

Подставляя это выражение в (3), получим

$$Q = \frac{4}{3}c_p\rho''\pi \frac{dR_{п}^3}{d\tau} \Delta T + \Delta F \omega_{пер}, \quad (5)$$

где $\omega_{пер} = dl_{пер}/d\tau_{пер}$ — скорость перемещения парового пузырька.

Параметры системы изменяются от «нулевых» (при $\tau=0$ $Q=0$ и, следовательно, $R_{п}=0$) до таких, которые соответствуют началу кипения ($\tau_{нк}$) теплоносителя в ПТТ и переходу от первого режима работы ПТТ ко второму, а именно:

$$\text{при } \tau=\tau_{нк} \quad Q=Q_{нк}, \quad R_{п}=R_{отр}, \quad \Delta T = \Delta T_{нк} = \frac{4\sigma T_s}{r\rho'' d_{тр}}$$

где $R_{отр}$ — радиус парового пузырька в момент отрыва;

$\Delta T_{нк}$ — температурный напор, соответствующий началу кипения;

T_s — температура насыщения в зоне нагрева;

σ — коэффициент поверхностного натяжения;

r — скрытая теплота парообразования;

$d_{тр}$ — внутренний диаметр трубки (является характерным размером в данном случае).

В соответствии с [13, с. 144], для диаметра парового пузырька в момент отрыва можно записать выражение

$$d_{отр} = \frac{l_k}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} \quad (6)$$

где l_k — капиллярная постоянная;

g — ускорение свободного падения;

ρ' — плотность жидкой фазы.

Преобразовав выражение (5) и проинтегрировав его с помощью метода разделения переменных, получим

$$(Q - \Delta F \omega_{\text{пер}}) \tau = \frac{4}{3} c_p \rho \pi \Delta T R_{\text{п}}^3 + C. \quad (7)$$

Постоянную интегрирования C найдем, подставляя граничное условие $\tau=0, R_{\text{п}}=0$. В результате получим $C=0$.

Капиллярные силы ΔF можно рассчитать, исходя из формулы для движущего капиллярного напора

$$\Delta p = \Delta F / S, \quad (8)$$

где S — площадь поперечного сечения ПТТ.

Подставив в выражение (7) второе граничное условие и проведя некоторые преобразования, получим

$$Q_{\text{нк}} = \frac{4}{3} \pi c_p \rho \pi \Delta T_{\text{нк}} \frac{R_{\text{отр}}}{\tau_{\text{нк}}} + \Delta p S \omega_{\text{пер}}. \quad (9)$$

Таким образом, тепловой поток, соответствующий началу активного кипения теплоносителя, прямо пропорционален перепаду давления между зонами нагрева и конденсации и скорости перемещения теплоносителя и обратно пропорционален времени аккумуляции тепловой энергии.

При оценке величин, входящих в (9), становится очевидным, что первое слагаемое намного меньше второго и при расчете им можно пренебречь. Тогда в упрощенном виде величину теплового потока, необходимого для начала активного кипения в ПТТ, можно рассчитать по формуле

$$Q_{\text{нк}} = \Delta p S \omega_{\text{пер}}. \quad (10)$$

Тепловой поток, рассчитываемый по этой формуле, относится к одному витку ПТТ.

Перепад давлений можно рассчитать по формуле Дарси — Вейсбаха [14, с. 118]:

$$\Delta p = \zeta \frac{l_{\text{пер}} \rho \omega_{\text{пер}}^2}{d_{\text{вн}} 2}, \quad (11)$$

где ζ — коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса.

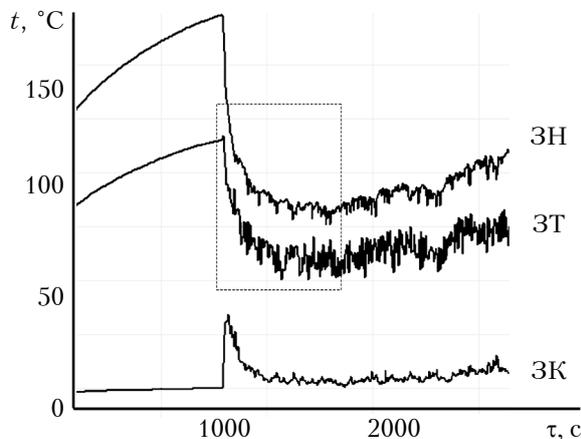


Рис. 2. Изменение температуры в зонах нагрева (ЗН), транспорта (ЗТ) и конденсации (ЗК) ПТТ во времени

Скорость перемещения можно рассчитать следующим образом:

$$\omega_{\text{пер}} = l_{\text{пер}} / \overline{\tau_{\text{пер}}}, \quad (12)$$

где $\overline{\tau_{\text{пер}}}$ — среднее время, необходимое для перемещения оторвавшегося парового пузыря из зоны нагрева в зону конденсации. В нашем случае оно может быть рассчитано с учетом результатов экспериментов, полученных в [9].

После начала кипения теплоносителя характер изменения температуры в различных зонах ПТТ во времени выглядит так, как показано на рис. 2.

Физическое представление процессов в ПТТ

После начала кипения и отрыва парового пузырька можно отследить его перемещение по температуре в зонах ПТТ. Будем считать, что время между двумя ближайшими максимумами температуры в зоне нагрева ПТТ соответствует прохождению парового пузырька внутри всей петли (что отвечает величине $2l_{\text{пер}}$). С физической точки зрения это выглядит так: зона нагрева прогревается до определенной температуры, потом паровой пузырек отрывается и следует в зону конденсации, увлекая за собой всю массу теплоносителя (поскольку процесс происходит в замкнутом пространстве). На графике это отображается падением температуры до минимума, потому что вместо прогретого теплоносителя в зону нагрева прибывает охлажденный теплоноситель из зоны конденсации: минимальные значения температурных колебаний соответствуют прохождению более холодного теплоносителя из зоны конденсации в зону нагрева, максимальные — прохождению нагретого теплоносителя. То есть рассчитать $\overline{\tau_{\text{пер}}}$ можно по формуле

$$\overline{\tau_{\text{пер}}} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \Delta \tau_i, \quad (13)$$

где n — количество максимумов (или минимумов) температуры в выбранном отрезке времени (выделен рамкой на рис. 2);

$\Delta \tau$ — время между двумя ближайшими максимумами (минимумами) температуры.

При определении скорости перемещения парового пузырька можно также воспользоваться формулами, приведенными в литературе [7; 15, с. 149]. Однако зарубежные авторы, как правило, представляют зависимость скорости парожидкостного потока теплоносителя от времени в виде периодической зависимости, т. е. можно определить только мгновенную скорость в каждый отдельно взятый момент времени. Кроме того, поскольку предложенная нами формула для расчета является полуэмпирической, могут возникнуть несовпадения результатов вследствие различий в условиях проведения экспериментов и значительной разницы в конструкциях используемых ПТТ.

При медленном охлаждении зоны конденсации (что соответствует меньшим значениям рас-

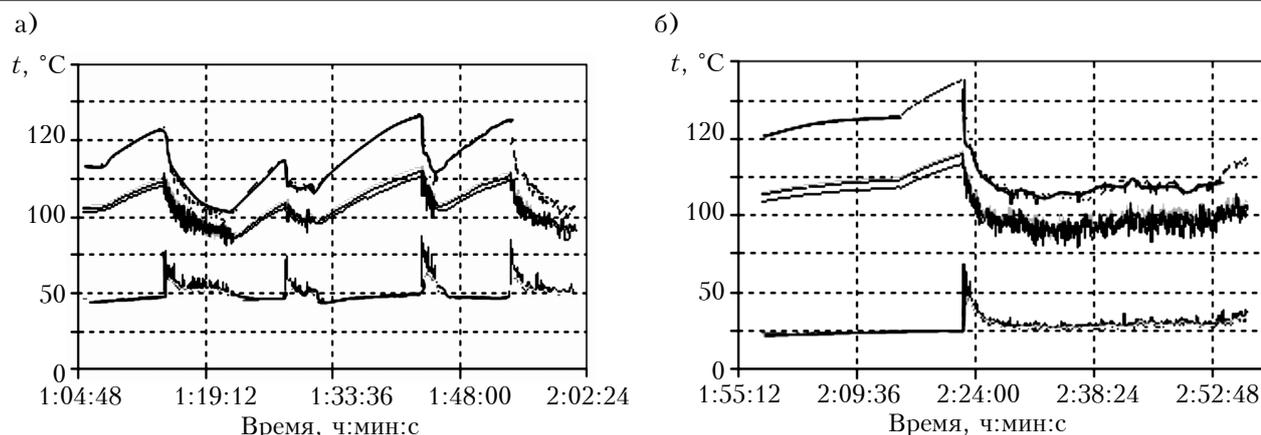


Рис. 3. Переход от кондуктивного режима теплоотдачи в ПТТ к пульсационному при $G=2,6 \cdot 10^{-3}$ кг/с для различных условий охлаждения зоны конденсации (время указано от начала эксперимента):
 а – $t_{вх} = 20^\circ\text{C}$; б – $t_{вх} = 40^\circ\text{C}$

хода G и температуры охлаждающей жидкости на входе в конденсатор $t_{вх}$) затягивается переход от кондуктивного режима теплоотдачи к пульсационному (рис. 3, а). При более интенсивном охлаждении зоны конденсации такого явления не наблюдалось (рис. 3, б). Это объясняется тем, что чем ниже температура в зоне конденсации, тем меньше давление насыщения, а значит, паровому пузырьку необходимо преодолеть больший перепад давления. Такой результат хорошо согласуется и с полученной формулой (10): чем меньше разница давлений между зонами нагрева и конденсации, тем меньше величина теплового потока, который нужно подвести для начала кипения теплоносителя.

Сравнение расчета по предложенной формуле с экспериментальными данными [9] представлено в таблице. Здесь видно, что расчетные значения теплового потока в большинстве случаев несколько превышают экспериментальные данные (погрешность составляет в среднем $\pm 21\%$). Это может быть связано с тем, что реальный пе-

Расчетные и экспериментальные значения теплового потока, необходимого для начала кипения при различных условиях охлаждения

$G \cdot 10^3$, кг/с	$t_{вх}$, °C	$Q_{нк}$, Вт	
		расчет	эксперимент
1,734	20	35	40
	30	36,5	34
	40	36,5	31
2,6	20	36,5	29
	30	36,5	30
	40	35,8	29
4,335	20	37,6	39
	30	37,8	20

репад давления между зонами нагрева и конденсации в ПТТ меньше расчетного, поскольку давление рассчитывается как функция температуры насыщения в конкретной зоне. Также при проведении эксперимента процесс выхода ПТТ на стационарный режим был довольно длительным, и теплоноситель мог прогреться достаточно для появления одиночных пузырьков в зоне нагрева и даже массового их перемещения внутри трубки. Однако такое отклонение расчетных данных от экспериментальных не препятствует применению формулы (10) для определения нижней границы эффективной работы ПТТ, поскольку очевидно, что при полученных с ее помощью значениях теплового потока $Q_{нк}$ теплопередача происходит уже в пульсационном режиме.

Выводы

Таким образом, получена формула для расчета величины теплового потока, необходимого для начала кипения теплоносителя и определяющего нижнюю границу эффективной работы замкнутой пульсационной тепловой трубы, изготовленной из меди, с водой в качестве теплоносителя. Информация о величине теплового потока необходима для проектирования систем охлаждения различных теплонагруженных элементов, чувствительных к перегреву, например светодиодов перспективных осветительных устройств.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Yun Li, Ye Lin, Erik P. Boonekamp, Lei Shi, Yi Mei, Tan Jiang, Qing Guo, Huarong Wu. LED Solution for E14 Candle Lamp // Proc. of SPIE. – 2009. – Vol. 7422. – 74220T1-74220T-12. DOI: 10.1117/12.835609.
2. Ашрятов А. А., Барина И. А. Исследование параметров светодиодных ламп и их драйверов // Светотехника та електроенергетика. – 2013. – № 1. – С. 14–20.
3. Полищук А., Туркин А. Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов // Компоненты и технологии. – 2008. – № 2. – С. 25–28
4. Николаенко Ю. Е. Решение тепловой проблемы мощных светодиодных светильников с помощью тепловых труб

// Труды XIII МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, г. Одесса. — 2012. — С. 203.

5. Николаенко Ю. Е., Кравец В. Ю., Алексеик Е. С. Комбинированная теплопередающая система испарительно-конденсационного типа // Труды XIV МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Т. 2. — Украина, г. Одесса. — 2013. — С. 28–29.

6. Yin D., Ma H. B. Analytical solution of oscillating flow in a capillary tube // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2013. — № 66. — P. 699–705.

7. Peng H., Pai P.F., Ma H. Nonlinear thermomechanical finite-element modeling, analysis and characterization of multi-turn oscillating heat pipes // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2014. — N 69. — P. 424–437.

8. Xu D., Chen T., Xuan Y. Thermo-hydrodynamics analysis of vapor-liquid two-phase flow in the flat-plate pulsating heat pipe // International communications in heat and mass transfer. — 2012. — N 39. — P. 504–508.

9. Кравец В. Ю., Наумова А. Н., Вовкогон А.Н. Исследование режимов теплообмена в пульсационной те-

пловой трубе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 1. — С. 39–43.

10. Yang H., Khandekar S. and Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes // Applied Thermal Engineering. — 2008. — Vol. 28, iss. 1. — P. 49–59.

11. Cao X. A novel design of pulsating heat pipes with improved performance // 13th Int. Heat Pipe Conf. — China. — 2004. — P. 302–307,

12. Khandekar S., Dollinger N., Groll M. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study // Applied Thermal Engineering. — 2003. — N 23. — P. 707–719.

13. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. — Киев: Наукова думка, 1980.

14. Гейер В. Г., Дулин В. С., Заря А. Н. Гидравлика и гидропривод: Учеб для вузов. — Москва: Недра, 1991.

15. Смирнов Г. Ф., Цой А.Д. Теплообмен при паробразовании в капиллярах и капиллярно-пористых структурах. — Москва: Издательство МЭИ, 1999.

Дата поступления рукописи
в редакцию 26.03 2014 г.

А. М. НАУМОВА, В. Ю. КРАВЕЦЬ, Ю. Є. НИКОЛАЄНКО

Україна, м. Київ, НТУУ «КПІ»

E-mail: yaya_2000@ukr.net, kravetz_kpi@ukr.net, yunikola@ukr.net

ФІЗИЧНЕ УЯВЛЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПОЧАТКУ КИПІННЯ В ПУЛЬСАЦІЙНІЙ ТЕПЛОВІЙ ТРУБІ

Отримано формулу для розрахунку теплового потоку, який забезпечує початок кипіння теплоносія в пульсацийній тепловій трубі (ПТТ), і визначено нижню границю ефективної роботи ПТТ. Показано, що основними факторами, що впливають на величину цього теплового потоку, є рушійний капілярний напір та швидкість руху парової бульбашки. Формулу для визначення теплового потоку було отримано для замкнених ПТТ, виготовлених з міді, з водою як теплоносієм. Інформація про величину теплового потоку є необхідною для подальшого проектування систем охолодження різноманітних теплонавантажених елементів, чутливих до перегріву, наприклад світлодіодів перспективних освітлювальних пристроїв.

Ключові слова: пульсацийна тепла труба, математична модель, початок кипіння, рушійний капілярний напір, світлодіод.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2-3.42
UDC 536.248.2; 628.941.8

A. N. NAUMOVA, V. YU. KRAVETS, YU. E. NIKOLAENKO
Ukraine, Kiev, NTUU «KPI»

E-mail: yaya_2000@ukr.net, kravetz_kpi@ukr.net, yunikola@ukr.net

PHYSICAL CONCEPT AND CALCULATION OF BOILING POINT IN A PULSATING HEAT PIPE

LED development is accompanied by the need to ensure a constructive solution for the thermal conditions problem. For this purpose one can use pulsating heat pipes (PHP), that operate more efficiently after the start of heat carrier boiling. This article describes the physical representation and formula that allows determining the boiling point, which is a lower bound of the PHP effective operating range. It is shown that the main factors influencing the required heat flow are driving capillary pressure and velocity of the vapor bubble. The formula was obtained for the closed PHP made of the copper with water as a heat carrier. Information about this heat flux can be used for further design of cooling systems for heat-sensitive elements, such as LED for promising lighting devices.

Keywords: pulsating heat pipe, mathematic model, boiling point, driving capillary pressure, LED.

REFERENCES

1. Yun Li, Ye Lin, Erik P. Boonekamp, Lei Shi, Yi Mei, Tan Jiang, Qing Guo, Huarong Wu. LED solution for E14 candle lamp. *Proc. of SPIE*, 2009, vol. 7422, 74220T1-74220T-12. DOI: 10.1117/12.835609.

2. Ashryatov A.A., Barinova I.A. [Investigation of the parameters of LED lamps and their drivers.]. *Svitlotekhnika ta elektroenergetika*, 2013, no 1, pp. 14-20. (in Russian)

3. Polishchuk A., Turkin A. [The degradation of the semiconductor light-emitting diodes based on gallium nitride

and its solid solutions]. *Komponenty i tekhnologii*, 2008, no 2, pp. 25-28. (in Russian)

4. Nikolaenko Yu. E. [Solution of the heat problem of high power LED lamps with heat pipes]. *Proc. of 13th International scientific-practical conf. "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odessa, 2012, pp. 203. (in Russian)

5. Nikolaenko Yu. E., Kravets V. Yu., Alekseik E. S. [Combined heat transfer system of evaporation-condensation type]. *Proc. of 14th International scientific-practical conf. "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odessa, 2013, vol. 2, pp.28-29. (in Russian)

6. Yin D., Ma H. B. Analytical solution of oscillating flow in a capillary tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, no 66, pp. 699-705.

7. Peng H., Pai P. F., Ma H. Nonlinear thermomechanical finite-element modeling, analysis and characterization of multi-turn oscillating heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, no 69, pp. 424-437.

8. Xu D., Chen T., Xuan Y. Thermo-hydrodynamics analysis of vapor-liquid two-phase flow in the flat-plate pulsating heat pipe. *International communications in heat and mass transfer*, 2012, no 39, pp. 504-508.

9. Kravets V.Yu., Naumova A.N., Vovkogan A.N. [Research of heat exchange rate of the pulsating heat pipe].

Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature, 2010, no 1, pp. 39-43. (in Russian)

10. Yang H., Khandekar S. and Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2008, vol. 28, iss. 1, pp. 49-59.

11. Cao X. A novel design of pulsating heat pipes with improved performance. *Proc. of 13th Int. Heat Pipe Conf.*, pp. 302-307, China, 2004.

12. Khandekar S., Dollinger N., Groll M. Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 2003, no 23, pp. 707-719.

13. Tolubinskiy V. I. *Teploobmen pri kipenii* [Heat exchange under boiling conditions] Kiev, Naukova dumka, 1980, 316 p. (in Russian)

14. Geyer V. G., Dulin V. S., Zarya A. N. *Gidravlika i gidroprovod* [Hydraulics and hydraulic circuit]. Moscow, Nedra, 1991, 330 p. (in Russian)

15. Smirnov G. F., Tsoy A. D. *Teploobmen pri paroobrazovanii v kapillyarakh i kapillyarno-poristykh strukturakh* [Heat exchange under vaporization in the capillaries and capillary-porous structures]. Moscow, MEI Publishing house, 1999, 440 p. (in Russian)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Вонг Б. П., Миттал А., Цао Ю., Старр Г. Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне.— Москва: Техносфера, 2014.

Книга состоит из трех разделов. В 1-м разделе содержатся весьма актуальные сведения об особенностях современных технологий СБИС уровня 130–90 нм. Во 2-м разделе описаны соответствующие приемы проектирования на физическом уровне для схем смешанного сигнала и аналоговых компонентов, схем памяти, методов снижения потребляемой мощности, схем ввода/вывода и защиты от электростатического разряда, целостности сигнала с учетом длинных межсоединений. В 3-м разделе рассмотрены приемы проектирования, обеспечивающие повышение выхода годных и учет вариаций технологического процесса.

Книга предназначена для конструкторов, инженеров-технологов, разрабатывающих новые технологии и соответствующие правила проектирования.



НОВЫЕ КНИГИ

Справочник по радиолокации. В двух кн. / Под ред. М.И. Сколника.— Москва: Техносфера, 2014.

Это третье издание Справочника. Радиолокационная техника как для гражданского применения, так и для военных целей продолжает развиваться в направлениях расширения области применения и совершенствовании технологии. Некоторые темы, отраженные в предыдущих изданиях справочника, которые представляют сейчас меньший интерес, были исключены из издания.



Д. т. н. В. Л. ЛАНИН¹, И. Б. ПЕТУХОВ²

Беларусь, г. Минск, ¹БГУИР, ²УП «КБТЭМ-СО» ГНПО «Планар»
E-mail: vlanin@bsuir.by, petuchov@kbtem.by

ПОЛУЧЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ ТЕРМОЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКОЙ В 3D ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ

Рассмотрены процессы получения микросварных соединений повышенной плотности в 3D интегральных схемах термозвуковой микросваркой, включающие использование повышенных частот ультразвука, применение микроинструмента с утонением рабочего торца и прецизионных устройств формирования шарика, обеспечивающих воспроизводимость качества соединений. При малом шаге расположения контактных площадок необходимо использовать проволоку малого сечения (25 мкм) в конструкциях приборов с многоуровневым расположением выводов и шахматным расположением контактных площадок на кристалле, когда максимальная длина формируемых перемычек составляет не более 4–5 мм.

Ключевые слова: микросварка, термозвук, соединения, интегральные микросхемы.

Микроминиатюризация электронных компонентов и создание функционально сложных микроэлектронных устройств, в частности 3D интегральных микросхем и многокристаллических модулей, вызвала особые проблемы в области формирования микросварных соединений. В 3D-сборках за счет сокращения длины межсоединений и замены длинных горизонтальных связей на короткие вертикальные повышается плотность упаковки компонентов и рабочая частота устройств. Однако наличие большого числа проволочных перемычек на различных уровнях усложняет монтаж и не способствует повышению надежности изделия [1].

Для формирования микросварных соединений повышенной плотности, когда размер контактных площадок на кристалле составляет 60×60 мкм и менее, шаг между соседними контактными площадками 40–50 мкм, а число выводов корпуса более 100 [2], совершенно очевидно, что необходимо использовать проволоку малого диаметра (≤ 25 мкм), а монтаж вести преимущественно термозвуковой микросваркой методом «шарик – клин» [3].

Одним из способов достижения высокой воспроизводимости сварных соединений при термозвуковой сварке с использованием проволоки уменьшенного диаметра (≤ 25 мкм) при сборке приборов с повышенной плотностью монтажа является применение ультразвуковых систем повышенной частоты (≥ 100 кГц) [4]. При этом обеспечивается сокращение времени сварки за счет интенсивного размягчения свариваемых материалов и лучшей передачи ультразвуковой энергии.

В настоящее время для обеспечения надежных межсоединений между кристаллом и выводной рамкой методом «шарик – клин» используют золотую проволоку (до 95% изготавливаемых микросхем в мире) [3]. Стабильность диаметра и симметрия образуемых электроискровым методом шариков определяют качество получаемых сварных соединений встык шариком на кристалле. Так, для контактной площадки размерами 60×60 мкм при микросварке золотой проволокой диаметром 25 мкм с шагом соединений 60 мкм необходимо обеспечить исходный диаметр оплавленного шарика 1,7–1,8 от диаметра проволоки (что меньше стандартного значения 2–2,5 диаметра проволоки), т. е. в диапазоне 42,5–45 мкм, для обеспечения размера деформированного шарика от 52,5 до 55 мкм [5]. Разброс значений диаметра исходных шариков $\pm 2,5$ мкм с учетом погрешности позиционирования сварочной головки ± 4 мкм может привести к выходу сварного соединения за пределы контактной площадки и повреждению топологии кристалла. Поскольку разброс по деформации соединений шариком встык на кристалле сильно зависит от геометрии рабочего торца капилляра, необходимо при выборе последнего учитывать паспортные отклонения его размеров.

Целью настоящей работы является определение условий формирования микросварных соединений повышенной плотности в 3D интегральных схемах термозвуковой микросваркой, включая оценку минимальных размеров контактных площадок на кристалле, выбор инструмента с утонением рабочего торца и оценка влияния па-

раметров геометрии рабочего торца на воспроизводимость качества соединений.

Оценка минимальных размеров контактных площадок для термозвуковой микросварки методом «шарик — клин»

Качество микросварных соединений может быть обеспечено, если центр шарика находится в точке пересечения диагоналей квадратной или прямоугольной контактной площадки на кристалле, а сама сварная точка не выходит за ее пределы. В действительности же сварная точка может быть смещена из-за ограничений по точности приводов установок по координатам X—Y, погрешности машинного зрения и разброса значений диаметра присоединенного шарика, а также его асимметрии. Положение шарика на контактной площадке ограничено ее размерами (рис. 1).

Известно [6], что коэффициент точности технологического процесса формирования соединения вычисляется как

$$K_T = \frac{\Delta}{6\sigma}, \tag{1}$$

где Δ, σ — соответственно, допускаемое и среднеквадратичное отклонения от центра контактной площадки.

Учитывая соотношение (1), формулу для коэффициента точности по координате X можно записать в следующем виде:

$$K_{TX} = \frac{L_x - D_{шx} - |\Delta X_1 - \Delta X_2|/2}{6\sigma_x}. \tag{2}$$

Входящие сюда величины относятся к координате X и означают:

$D_{шx}$ — средний размер деформированного шарика;

$|\Delta X_1 - \Delta X_2|/2$ — среднее отклонение центра шарика от центра площадки или среднее значение ошибки позиционирования;

σ_x — среднеквадратичное отклонение положения центра шарика от центра контактной площадки.

Аналогично для коэффициента точности по координате Y имеем

$$K_{TY} = \frac{L_y - D_{шy} - |\Delta Y_1 - \Delta Y_2|/2}{6\sigma_y}, \tag{3}$$

где входящие величины означают то же самое, что и в формуле (2), применительно к оси Y.

Из соотношений (2) и (3) следует, что коэффициенты точности зависят как от разброса значений диаметра деформированных шариков на контактных площадках, так и от отклонений $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta Y_1, \Delta Y_2$, обусловленных погрешностями позиционирования по координатным осям и погрешности системы машинного зрения.

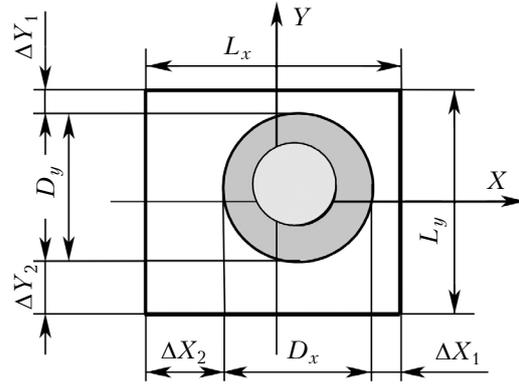


Рис. 1. Условное положение шарика на контактной площадке

(для соответствующих координатных осей указаны: D_x, D_y — размеры шарика; L_x, L_y — размеры контактной площадки; $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta Y_1, \Delta Y_2$ — размеры, определяющие положение шарика на площадке; меньший круг соответствует сечению проволоки)

Была проведена оценка точности позиционирования шарика золотой проволоки диаметром $D_{п}=25$ мкм на контактной площадке размером 80×80 мкм на кристалле при монтаже термозвуковой микросваркой на установке ЭМ-4260. Размер исходного шарика устанавливался $2,2 \times D_{п}$. Получены следующие результаты:

$$\begin{aligned} D_{шx} &= 65,3 \text{ мкм}; D_{шy} = 66,5 \text{ мкм}; \\ |\Delta X_1 - \Delta X_2|/2 &= 2,6 \text{ мкм}; |\Delta Y_1 - \Delta Y_2|/2 = 2,7 \text{ мкм}; \\ \sigma_x &= 0,98 \text{ мкм}; \sigma_y = 1,1 \text{ мкм}; \\ K_{TX} &= 2,08; K_{TY} = 1,63. \end{aligned}$$

Как видно, полученные коэффициенты точности больше нормативного значения 1,3 [6], поэтому можно говорить о том, что при сборке приборов процесс стабилен с выходом годных не менее 99,1%. Нетрудно убедиться, что для контактных площадок размером 60×60 мкм необходимо уменьшить диаметр деформированных шариков по крайней мере до 48 мкм и тогда получим $K_{TX}=1,61$ и $K_{TY}=1,42$. Другим возможным решением является использование проволоки уменьшенного диаметра, например 20 мкм. При этом диаметр исходного шарика будет стандартным по отношению к диаметру проволоки, а именно $2 \times D_{п}$ (40 мкм). Разварка кристаллов кредитных карточек на ленте Heraeus (Германия) с размером контактных площадок 60×60 мкм на установке ЭМ-4060П не увенчалась успехом, поскольку погрешность позиционирования установки (значения $|\Delta X_1 - \Delta X_2|/2$ и $|\Delta Y_1 - \Delta Y_2|/2$ составляют порядка 8 мкм) не позволила обеспечить стабильность процесса из-за выхода сварной точки за границы контактной площадки. При этом коэффициенты K_{TX} и K_{TY} не превышают значения 0,83. Необходимо отметить, что для обеспечения воспроизводимой деформации шариков малого диаметра ($\leq 2D_{п}$) требуется прецизионная работа ультразвуковой системы, а рабочий

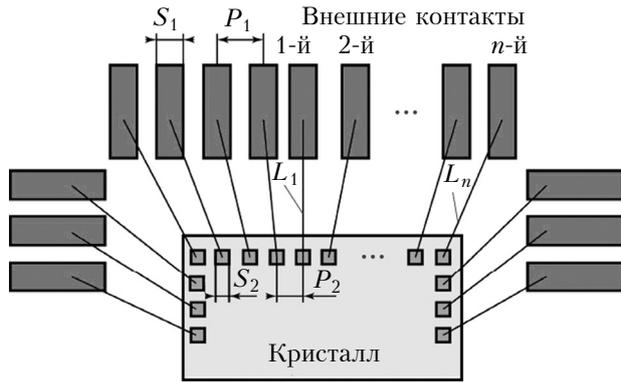


Рис. 2. Схема проволочных межсоединений между контактными площадками кристалла и корпуса прибора

диапазон устанавливаемых параметров микросварки сужается.

При формировании соединений проволокой малого диаметра сложно образовать прямолинейные проволочные выводы при достаточно большой их длине. Рассмотрим для примера верхнюю сторону сборки многовыводного прибора, с равномерно распределенными контактными площадками на корпусе прибора с шагом P_1 и контактными площадками на кристалле с шагом P_2 , как показано на рис. 2.

Рассчитаем максимальную длину, которую может иметь вывод на данной схеме, т. е. n -й по счету вывод относительно 1-го, контактные площадки которого находятся на вертикальной оси. Рассмотрим на рис. 2 прямоугольную трапецию, боковые стороны которой образованы отрезками длиной L_1 и L_n , а основания — отрезками между контактными площадками корпуса прибора и контактными площадками на кристалле для этих выводов. Таким образом, длину n -го вывода можно вычислить как

$$L_n = \sqrt{((n-1)P_2 - (n-1)P_1)^2 + L_1^2}. \quad (4)$$

При $n=30$, $P_1=0,3$, $P_2=0,09$ и $L_1=1,5$, например, получим $L_n=6,2$ мм.

Формирование выводов такой длины проволокой уменьшенного диаметра является сложной задачей и требует не только точных интерполированных движений микроинструмента в системе координат XYZ, но и проволоки с необходимыми упругими свойствами.

Из соотношения (4) видно, что основной вклад в увеличение длины вывода вносит разница в шаге выводов корпуса и кристалла. С конструктивной точки зрения выполнить ширину контактных площадок корпуса S_1 менее 100 мкм очень сложно и нецелесообразно из-за невозможности обеспечить необходимую прочность соединения «встык» при его малой площади. Возможным решением проблемы является многоуровневое расположение выводов корпуса и шахматное расположение контактных площадок на кристалле.

Выбор капилляра для соединений повышенной плотности

Выбор геометрии капилляра для термовзвучной сварки имеет большое значение, и при его подборе необходимо учитывать определенные требования. Для определения требуемого диаметра шарика под выбранный из каталога капилляр (рис. 3) фирм-производителей микроинструментов, например SPT (Швейцария), можно воспользоваться следующим соотношением [7]:

$$FAB = (1,5H^2(H-WD) + \frac{CD^3-H^3}{4\text{tg}(0,5CA)} + 1,5 \cdot MBD^2 \cdot MBH)^{1/3}, \quad (5)$$

где FAB — диаметр исходного шарика;

H — диаметр отверстия капилляра;

WD — диаметр проволоки;

CD — диаметр внутренней фаски;

CA — угол внутренней фаски;

MBD — диаметр деформированного шарика;

MBH — высота деформированного шарика.

Рассчитаем необходимый диаметр исходного шарика для проволоки диаметром 25 мкм при среднем диаметре деформированного шарика 65 мкм и его высоте 15 мкм для присоединения к контактными площадкам кристалла размером 80×80 мкм. Из каталога SPT выбираем стандартный инструмент типа UTF-38HG [9] и, подставляя значения его параметров в выражение (5), получим $FAB=57,3$ мкм.

Отношение полученного диаметра шарика к диаметру проволоки составляет $57,3/25=2,29$, что является стандартным значением. Полученный результат позволяет корректно установить необходимые режимы работы блока формирования шарика, а именно ток разряда и его длительность, исходя из технических характеристик

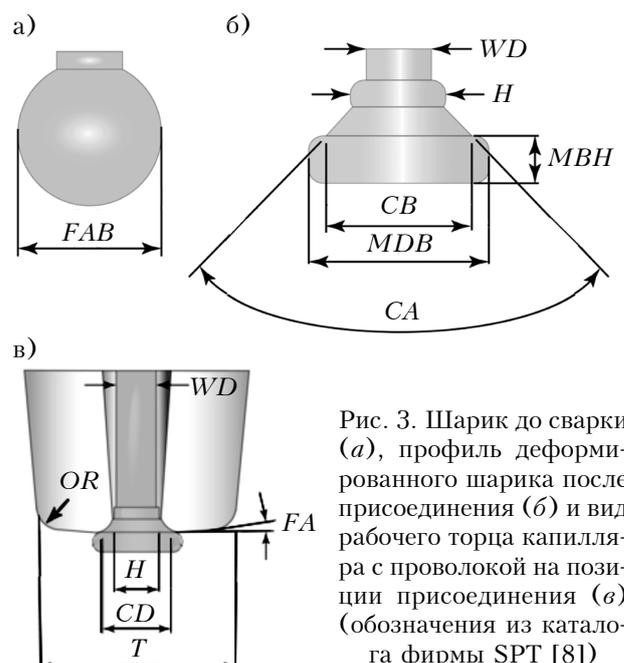


Рис. 3. Шарик до сварки (а), профиль деформированного шарика после присоединения (б) и вид рабочего торца капилляра с проволокой на позиции присоединения (в) (обозначения из каталога фирмы SPT [8])

блока и рекомендаций производителей конкретного типа проволоки.

Рассмотрим влияние геометрии торца капилляра на процесс термозвуковой сварки.

1. Диаметр отверстия капилляра выбирают равным 1,3–1,4 диаметра проволоки для свободного скольжения проволоки. В случае повышенной плотности соединений уменьшаются размеры рабочего торца, и это отношение диаметров уменьшают до 1,2.

2. Диаметр внутренней фаски CD и ее угол CA определяют форму и размер деформированного шарика, поскольку с ними связано растекание материала при деформации объема исходного шарика. Деформированный шарик состоит из трех частей (рис. 3, б). Верхняя цилиндрическая часть определяется диаметром отверстия капилляра H , далее под ней располагается конусная часть, образуемая из-за наличия внутренней фаски и угла CA , типовое значение которого находится в диапазоне от 70 до 120°. Нижняя часть имеет диаметр MDB , зависящий от приложенного к капилляру усилия и подводимой ультразвуковой энергии. Чем больше угол CA , тем больше диаметр деформированного шарика. Поэтому для сборки приборов с повышенной плотностью монтажа необходимо выбирать капилляры с углом внутренней фаски до 90°.

3. Угол торца капилляра FA в большей степени определяет надежность и прочность второй сварки встык на внешних выводах прибора и выбирается равным 4 или 8°. При пониженной температуре сварки в диапазоне от 140 до 80°C наиболее эффективным является применение капилляров с углом торца 4°. Внешний радиус OR предотвращает подрезание проволоки в месте второй сварки.

4. Для того чтобы торец капилляра не касался соседних соединений и перемычек в случае малого размера контактных площадок и малого расстояния между ними, используют капилляр с утоненным наконечником (рис. 4). При его подборе необходимо учитывать диаметр торца T , точнее $T/2$, определяемый расстоянием BPP

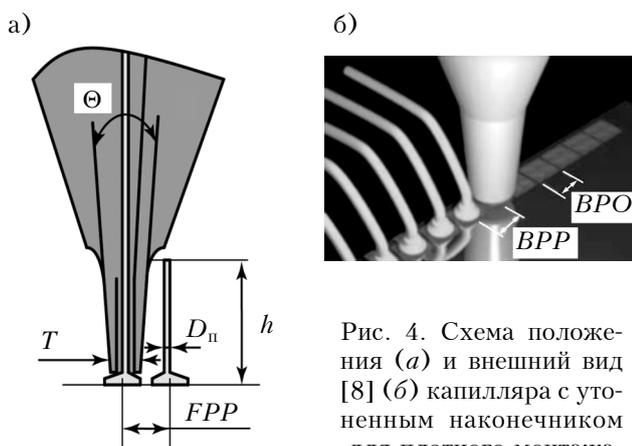


Рис. 4. Схема положения (а) и внешний вид [8] (б) капилляра с утоненным наконечником для плотного монтажа

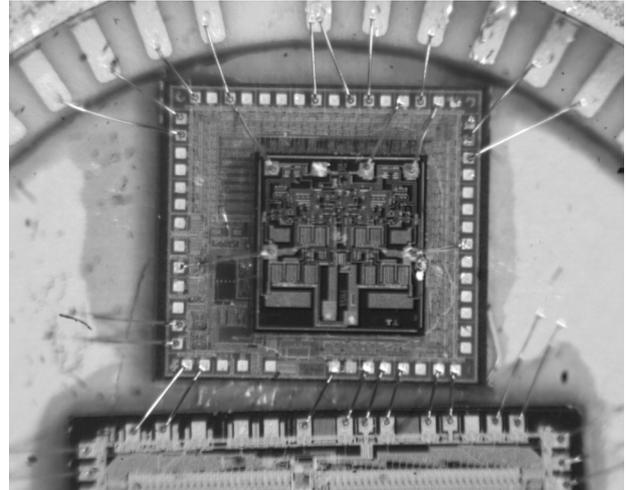


Рис. 5. Многокристаллический модуль в металлокерамическом корпусе с проволочными межсоединениями типа «шарик — клин»

между центрами контактных площадок на кристалле (рис. 4, б; здесь BPO — размер вскрытой контактной площадки от пассивации).

Из рис. 4, а видно, что при определенной высоте перемычки возможно ее касание с торцом капилляра, представляющего собой конус. Минимальное расстояние FPP между центрами сварных точек определяется углом конуса Θ и высотой перемычки h и может быть вычислено по формуле

$$FPP = \frac{h}{\tan \Theta} + \frac{WD}{2} \quad (6)$$

Термозвуковая микросварка шариком при повышенной частоте ультразвука 104 кГц была применена при монтаже золотых проволочных перемычек диаметром 25 мкм в многокристаллическом модуле (рис. 5). Модуль собран в металлокерамическом 40-выводном корпусе, в котором установлены три кристалла ИС, включая конструкцию «кристалл на кристалле». На нижнем кристалле этой конструкции имеются контактные площадки с выращенными золотыми контактными выступами (бампами) для обеспечения межкристаллического соединения проволочными выводами без повреждения контактных площадок в месте второй сварки методом «шарик — клин». Микросварка выполнялась при температуре рабочей зоны 145°C. Следует отметить, что выращивание контактных площадок в виде выступов необходимой толщины является сложным и дорогостоящим процессом. Альтернативным методом создания бампов на контактных площадках кристалла может быть технология присоединения к ним оплавленных шариков на конце золотой проволоки с отделением проволоки у места перехода проволоки в шар. Подобные конструкции позволяют собрать сложную измерительную систему, включая сенсоры, в одном корпусе или на подложке с минимизацией площади монтажа.

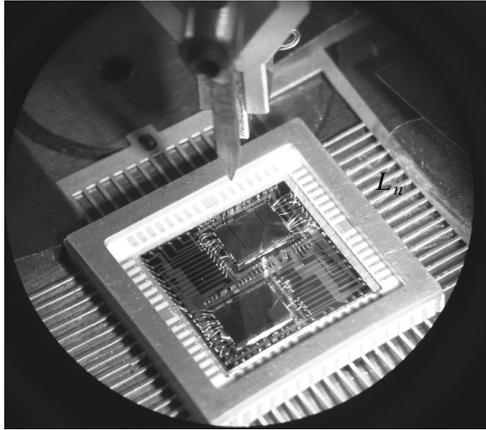


Рис. 6. Многокристаллический модуль в корпусе CQFP с проволочными межсоединениями типа «клин — клин»

При сборке таких приборов существенным преимуществом обладает метод термозвуковой сварки «шарик — клин», позволяющий формировать короткие межкристаллические связи без сложных перемещений капилляра, которые необходимы при микросварке методом «клин — клин» (рис. 6). С другой стороны, при сборке методом «клин — клин» проще обеспечить прямолинейность длинных межсоединений.

Заклучение

Пути решения проблем, возникающих при термозвуковой микросварке соединений повышенной плотности, можно обозначить как следующие:

- при малом шаге расположения контактных площадок необходимо использовать проволоку малого сечения (25 мкм) в конструкциях приборов с многоуровневым расположением выводов и шахматным расположением контактных площадок на кристалле, когда максимальная длина формируемых перемычек составляет не более 4–5 мм;
- использование микроинструмента с утонченным рабочим торцом и оптимальными геометрическими параметрами для конкретного диаметра проволоки;

- применение прецизионных устройств формирования шарика, преимущественно отрицательной полярности, обеспечивающих воспроизводимый диаметр образуемых шариков;
- применение ультразвукового генератора с точной регулировкой подводимой энергии и поддержанием ультразвуковой системы на резонансной частоте для обеспечения минимального разброса деформации шарика на контактных площадках кристаллов ИС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Integrated interconnect technologies for 3D nano electronics systems / Ed. by M.S. Bakir, J.D. Meindl. — London: Artech House, 2009.
2. Zhong Z., Goh K.S. Analysis and experiments of ball deformation for ultra fine pitch wire bonding // Journal of Electronics Manufacturing. — 2001. — Vol. 10, N 4. — P. 365–371.
3. Harmann G.G. Wire bonding in microelectronics. — USA, NY: McGraw Hill, 3-d edition, 2010.
4. Ланин В., Петухов И., Мордвинцев Д. Повышение качества микросварных соединений в интегральных схемах с использованием ультразвуковых систем повышенной частоты // Технологии в электронной промышленности. — 2010. — № 1. — С. 48–50.
5. Lanin V.L., Petukhov I.B. The spark process of ball formation upon thermosonic welding in electronics // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. — 2013. — Vol. 49, N 2. — P. 148–151. DOI:10.3103/S1068375513020087.
6. Bhoite K.R., Bhoite A.K. World class quality. Using design of experiments to make it happen. — USA, NY: Amacom, 2000.
7. <http://www.smallprecisiontools.com/products-and-solutions/chip-bonding-tools/bonding-capillaries/technical-guide/process-optimization/typical-wire-bond-process-optimization/?oid=569&lang=en>
8. <http://www.smallprecisiontools.com/products-and-solutions/chip-bonding-tools/bonding-capillaries/technical-guide/basic-capillary-design-rules/?oid=560&lang=en>
9. <http://www.smallprecisiontools.com/publications-and-catalogues/chip-bonding-tools-catalogues-and-brochures/chip-bonding-tools-catalogues-pdf-catalogues/?oid=452&lang=en>

*Дата поступления рукописи
в редакцию 21.11 2013 г.*

В. Л. ЛАНИН, И. Б. ПЕТУХОВ

Білорусь, м. Мінськ, БГУІР, УП «КБТЕМ-СО» ДНВО «Планар»
E-mail: vlanin@bsuir.by, petuchov@kbtcm.by

ОТРИМАННЯ З'ЄДНАНЬ ПІДВИЩЕНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ТЕРМОЗВУКОВИМ МІКРОЗВАРЮВАННЯМ У 3D ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМАХ

Розглянуто процеси отримання микросварних з'єднань підвищеної щільності в 3D інтегральних схемах термозвуковим микросварюванням, що включають використання підвищених частот ультразвуку, застосування мікроінструментів з тоншенням робочого торця і прецизійних пристроїв формування кульки, що забезпечують відтворюваність якості з'єднань.

Ключові слова: микросварювання, термозвук, з'єднання, інтегральні мікросхеми.

OBTAINING RAISED DENSITY CONNECTIONS BY THERMOSONIC
MICROWELDING IN 3D INTEGRATED MICROCIRCUITS

The authors consider the processes of obtaining raised density microwelded connections in 3D-integrated microcircuits by the thermosonic microwelding. The processes include the use of the raised frequencies of ultrasound, application of the microinstrument with a thinning of the working end and precision devices for ball formation, which provide reproducibility of connections quality.

At a small step of contact pads, the use of a wire of small diameter (not more than 25 μm) is necessary for devices with a multilevel arrangement of leads and chess arrangement of contact pads on the chip, providing the maximum length of the formed crosspieces does not exceed 4–5 mm.

Keywords: microwelding, thermosonic, connections, integrated microcircuits.

REFERENCES

1. *Integrated Interconnect Technologies for 3D Nano Electronics Systems*. Ed. by M.S. Bakir, J.D. Meindl, London, Artech House, 2009, 528 p.
2. Zhong Z., Goh K.S. Analysis and experiments of Ball deformation for ultra fine pitch wire bonding. *Journal of Electronics Manufacturing*, 2001, vol. 10, no 4, pp. 365–371.
3. Harmann G.G. *Wire Bonding in Microelectronics*, USA, NY: McGraw Hill, 3-d edition, 2010, 432 p.
4. Lanin V., Petuhov I., Mordvintsev D. [Improvement of microwelded connections quality in integrated circuits by use raised frequency ultrasonic systems] *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2010, no 1, pp. 48–50 (in Russian)
5. Lanin V.L., Petukhov I.B. The spark process of ball formation upon thermosonic welding in electronics. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2013, vol. 49, no 2, pp. 148–151. DOI:10.3103/S1068375513020087.
6. Bhote K.R., Bhote A.K. *World class quality. Using design of experiments to make it happen*. USA, NY, Amacom, 2000, 487 p.
7. <http://www.smallprecisiontools.com/products-and-solutions/chip-bonding-tools/bonding-capillaries/technical-guide/process-optimization/typical-wire-bond-process-optimization/?oid=569&lang=en>
8. <http://www.smallprecisiontools.com/products-and-solutions/chip-bonding-tools/bonding-capillaries/technical-guide/basic-capillary-design-rules/?oid=560&lang=en>
9. <http://www.smallprecisiontools.com/publications-and-catalogues/chip-bonding-tools-catalogues-and-brochures/chip-bonding-tools-catalogues-pdf-catalogues/?oid=452&lang=en>

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Сукачев Э. А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами.—
Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2013.

Приведены принципы построения и функционирования сетей связи с подвижными объектами при использовании сотовой структуры зоны покрытия; основы организации многостанционного доступа с различными видами разделения сигналов; технические характеристики цифровых стандартов систем подвижной радиосвязи, получивших широкое признание в мировой практике. Исследуются различные модели распространения радиоволн вблизи поверхности земли, которые используются для расчетов уровня сигнала на входе приемников базовых и мобильных станций. Большое внимание уделяется вопросам анализа внутрисистемных помех и методам их уменьшения. Приводятся расчетные формулы для определения отношения сигнал/помеха в любой точке соты, а также для контроля степени изменения этого отношения при перемещении мобильной станции в пределах соты. Впервые в систематизированном виде изложены основы геометрии сотовых структур. С позиции теории массового обслуживания рассмотрены элементы проектирования сотовых сетей подвижной радиосвязи. Теоретический материал иллюстрируется большим количеством числовых примеров. Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов, аспирантов и специалистов в области проектирования, разворачивания и тестирования сотовых сетей радиосвязи с подвижными объектами.



Д. ф.-м. н. П. Д. МАРЬЯНЧУК, Л. Н. ДЫМКО, Т. Р. РОМАНИШИН, Т. Т. КОВАЛЮК,
к. т. н. В. В. БРУС, М. Н. СОЛОВАН, А. И. МОСТОВОЙ

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
E-mail: p.maryanchuk@chnu.edu.ua

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЗОННАЯ СТРУКТУРА КРИСТАЛЛОВ $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, ЛЕГИРОВАННЫХ МАРГАНЦЕМ

В результате исследования магнитных, кинетических и оптических свойств кристаллов $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ ($x = 0,5$) установлено, что в них имеют место прямые межзонные оптические переходы. Температурная зависимость электропроводности образцов имеет полупроводниковый характер, а температурная зависимость коэффициента Холла свидетельствует о смешанном типе проводимости. Особенности магнитных свойств обусловлены наличием в кристаллах кластеров типа $\text{Mn}-\text{Te}-\text{Mn}-\text{Te}$, в которых между атомами Mn через атомы халькогена осуществляется косвенное обменное взаимодействие антиферромагнитного характера. На основе проведенных исследований определены зонные параметры и построена схема зонной структуры кристаллов с концентрацией атомов марганца около 10^{20} см^{-3} .

Ключевые слова: кристалл, магнитная восприимчивость, кластер, электропроводность.

Марганецсодержащие твердые растворы на основе соединений типа $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ относятся к новому классу полупроводниковых кристаллов — полумагнитным полупроводникам [1]. Твердые растворы $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, образованные на основе бесщелевого полупроводника HgTe ($E_g = -0,15$ эВ) и широкозонного дефектного полупроводника Al_2Te_3 ($E_g = 2,35$ эВ), также являются дефектными полупроводниками с переменной, в зависимости от состава, шириной запрещенной зоны E_g . Изменение зонной структуры и ширины запрещенной зоны при изменении состава (x) позволяет получать полупроводники с различными свойствами и зонными параметрами, которые будут определять практическое использование этих кристаллов. Кроме того, свойства дефектных полупроводников, какими являются и твердые растворы $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, слабо изменяются под воздействием радиации, что делает их перспективными для использования в условиях повышенной радиации в качестве различных датчиков физических величин.

Легирование кристаллов $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$ 3d-элементами (которые имеют собственный магнитный момент) переводит их в класс полумагнитных полупроводников, которые являются чрезвычайно интересным объектом для фундаментальных исследований и могут использоваться для создания приборов спинтроники [2, 3].

Целью данной работы было исследование магнитных, кинетических и оптических свойств кристаллов $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ (при $x=0,5$ и концентрации атомов Mn $N_{\text{Mn}} \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$), опре-

деление их зонных параметров и изготовление на их основе гетеропереходов.

Методика эксперимента

Кристаллы для исследований были получены методом Бриджмена. При выборе температуры синтеза и выращивания кристаллов были использованы диаграммы состояния твердых растворов, которые входят в их состав [4].

Ампулы с вытянутым конусообразным концом изготавливали из толстостенного кварца. Для того чтобы предотвратить взаимодействие загружаемого материала с кварцем, ампулы графитизировали, после чего их повторно сушили в вакуумном шкафу и оставляли в вакууме до загрузки в них шихты из смеси элементарных веществ — Hg, Te, Al, Mn. После загрузки материалов ампулу откачивали до давления примерно 10^{-2} Па и запаивали.

Поскольку исходные компоненты (элементарные вещества) имеют разную плотность, для лучшего перемешивания материалов в расплаве синтез проводили в трубчатой качающейся электропечи. Для предотвращения выхода печи из строя в случае разрушения ампулы и для выравнивания температуры по длине ампулы, ее помещали в металлическую гильзу.

Исследование магнитных свойств образцов кристаллов, легированных марганцем, проводили методом Фарадея в интервале значений температуры $T = 77 - 300$ К и магнитного поля $H = 0,25 - 4$ кЭ. Магнитную восприимчивость χ измеряли относительно эталона с известным ее значением, исследуемые образцы (массой около 200 мг) размещали в тех точках магнитного поля, где нахо-

дился эталонный образец при градуировке установки. Для регистрации взаимодействия исследуемого образца с магнитным полем использовали электронные весы ЭМ-И-ЗМ с чувствительностью 1 мкг. Измеряемый сигнал регистрировали с помощью микроамперметра М95 и вольтметра В7-21. Проведенные оценки показывают, что суммарная погрешность при измерении магнитной восприимчивости не превышает 1% и состоит в основном из систематической погрешности, связанной с определением массы образца и эталона, а также с неточностью расположения образца в магнитном поле, и случайной, которая обусловлена неточностью измерения величины сигнала.

Исследования кинетических коэффициентов проводились на тех же образцах в интервале $T = 77 - 300$ К и $H = 0,5 - 5$ кЭ (размер образцов $8 \times 2 \times 1,5$ мм). Суммарная погрешность определения электропроводности составляет примерно 2%, коэффициента Холла — 6%, при измерении коэффициента термо-эдс — не превышает 6%.

Измерения оптического пропускания проводились с помощью спектрометра ИКС-21 в интервале значений длины волны $\lambda = 1 - 12$ мкм с учетом того, что коэффициент отражения R для твердых растворов на основе халькогенидов ртути в исследуемой области спектра составляет примерно 0,3 [5].

Магнитные свойства кристаллов $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x: \langle \text{Mn} \rangle$

Исследовались магнитные свойства четырех образцов кристаллов с различным содержанием Mn (см. таблицу). Установлено, что один из них — образец №1 в температурном интервале $T = 230 - 300$ К проявляет диамагнитные свойства, остальные же обладают парамагнитными свойствами, и их магнитная восприимчивость имеет характерный для парамагнетиков вид во всем исследованном диапазоне (рис. 1). Рост χ при уменьшении T обусловлен уменьшением ра-

Магнитные и кинетические свойства образцов кристаллов $(\text{ZnHgTe})_{0,5}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_{0,5}: \langle \text{Mn} \rangle$

№ образца	$N_{\text{Mn}}, \text{см}^{-3}$	$\theta, \text{К}$	$\mu_{\text{эф}}, \mu_{\text{Б}}$	$T_C, \text{К}$
1	$0,9 \cdot 10^{20}$	0	5,12	155
		-65	6,11	
2	$1,1 \cdot 10^{20}$	0	5,11	125
		-62	5,73	
3	$1,2 \cdot 10^{20}$	0	4,78	110
		-135	5,83	
4	$1,3 \cdot 10^{20}$	0	5,43	160
		-67	6,19	

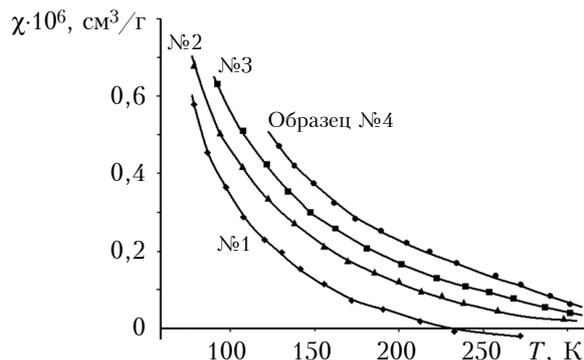


Рис. 1. Температурная зависимость магнитной восприимчивости для четырех исследуемых образцов кристаллов $(\text{ZnHgTe})_{0,5}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_{0,5}: \langle \text{Mn} \rangle$

зорирующего воздействия тепловых колебаний атомов кристаллической решетки на магнитные моменты атомов Mn в магнитном поле.

На основе измеренных зависимостей $\chi = f(T)$ получены температурные зависимости обратной магнитной восприимчивости $1/\chi_{\text{Mn}}$ атомов магнитной компоненты (Mn) (рис. 2):

$$1/\chi_{\text{Mn}} = 1/(\chi - \chi_0), \tag{1}$$

где χ_0 — диамагнитный вклад кристаллической решетки, созданный атомами Hg, Te, Al, Mn (без вклада 3d-электронов марганца).

Из полученных результатов следует, что для всех исследованных образцов зависимости $1/\chi_{\text{Mn}} = f(T)$ в исследуемом интервале температур описываются законом Кюри — Вейсса

$$\chi = C/(T - \theta), \tag{2}$$

где C — постоянная Кюри; θ — парамагнитная температура Кюри.

Низкотемпературные прямолинейные участки на температурных зависимостях $1/\chi_{\text{Mn}}$ для исследуемых образцов описываются законом Кюри, а высокотемпературные — законом

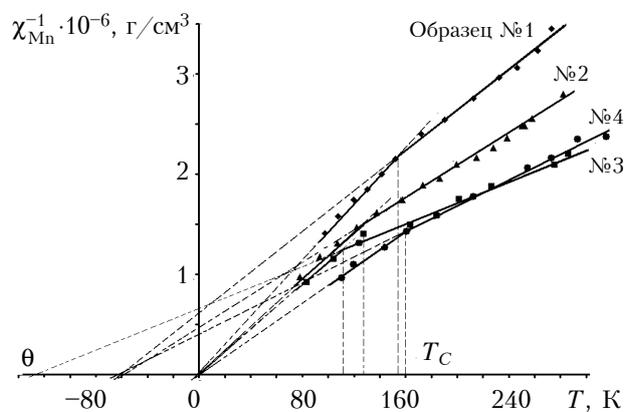


Рис. 2. Температурная зависимость обратной магнитной восприимчивости атомов марганца для четырех исследуемых образцов кристаллов $(\text{ZnHgTe})_{0,5}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_{0,5}: \langle \text{Mn} \rangle$

Кюри–Вейсса с отрицательными парамагнитными температурами Кюри. Отрицательность значений θ указывает на то, что в исследуемых кристаллах между атомами Mn при его концентрации около 10^{20} см^{-3} возникает обменное взаимодействие антиферромагнитного характера.

В соответствии с [6], весьма вероятно, что в кристаллах $(\text{3HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ имеются кластеры типа Mn–Te–Mn–Te. По характеру обменного взаимодействия они подобны фазе MnTe, поскольку образуются в результате изовалентного замещения в кристаллах атомов ртути атомами Mn. Между атомами Mn через атомы халькогена осуществляется косвенное обменное взаимодействие «антиферромагнитного» характера. Изменение наклона линейных участков (изломы) графиков зависимости $1/\chi_{\text{Mn}} = f(T)$ при $T = T_C$ обусловлено переходом кластеров в парамагнитное состояние при повышении температуры. Чем больше размер кластеров, тем больше значение T_C .

Экстраполяция до пересечения с осью температуры прямолинейных участков зависимости $1/\chi_{\text{Mn}} = f(T)$ для образца дает значение θ , которое позволяет получить значение концентрации марганца в нем.

Увеличение эффективного магнитного момента атомов Mn $\mu_{\text{эф}}$ при повышении температуры (установлено с помощью закона Кюри–Вейсса при изменении наклона линейных участков при $T = T_C$ на зависимостях $1/\chi_{\text{Mn}} = f(T)$) подтверждает то, что при $T = T_C$ кластеры переходят из «антиферромагнитного» в парамагнитное состояние. Значения $\mu_{\text{эф}}$ и θ приведены в таблице, где каждая верхняя строка соответствует более низкотемпературному прямолинейному участку зависимости $1/\chi_{\text{Mn}} = f(T)$ на рис. 2 (количество значений $\mu_{\text{эф}}$ и θ равно числу прямолинейных участков разного наклона).

Кинетические свойства кристаллов $(\text{3HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$

Закономерности изменения кинетических коэффициентов исследуемых образцов при изменении температуры позволяют предположить, что на явления переноса в этих кристаллах, как и в кристаллах других твердых растворов на основе теллурида ртути, в основном влияют вакансии в подрешетке Hg (акцепторы), междоузельные атомы Hg и вакансии в подрешетке Te (доноры) [7].

Характер температурной зависимости электропроводности исследуемых образцов такой же, как и у полупроводников, т. е. с ростом T растет и σ (рис. 3, а), что обусловлено увеличением концентрации носителей заряда при росте температуры.

Характер температурных зависимостей коэффициента Холла R_H (рис. 3, б) свидетельствует о том, что в исследуемом интервале температур в материале образцов присутствуют и принимают участие в явлениях переноса как дыр-

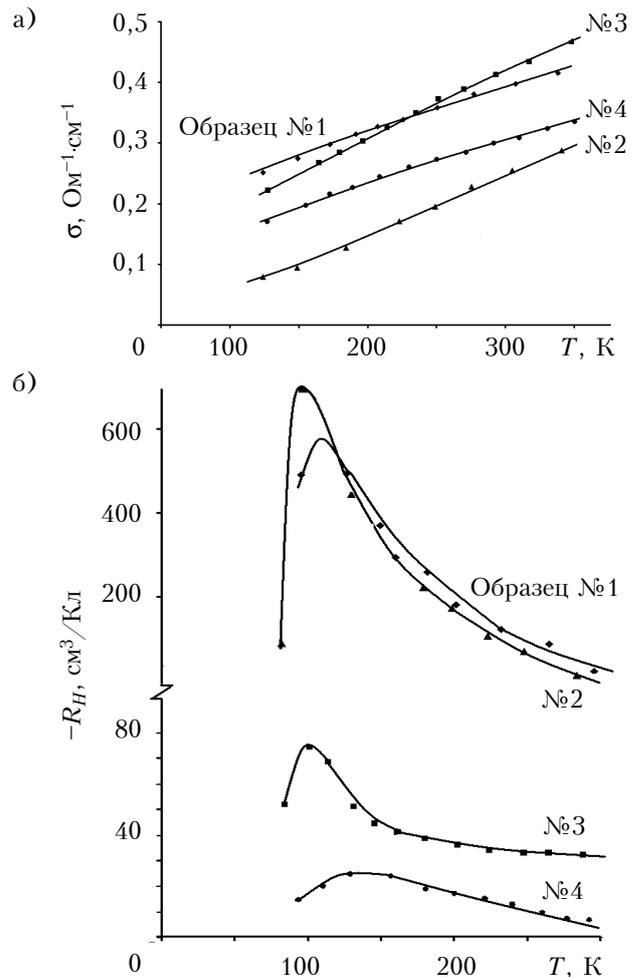


Рис. 3. Температурная зависимость удельной электропроводности (а) и коэффициента Холла (б) для четырех исследуемых образцов кристаллов $(\text{3HgTe})_{0,5}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_{0,5}:\langle\text{Mn}\rangle$

ки, так и электроны, т. е. проводимость имеет смешанный характер.

Стремление коэффициента Холла к инверсии знака при низких температурах ($T < 77 \text{ K}$) свидетельствует о том, что в исследуемых образцах при низких температурах преобладает p -тип проводимости. При повышении температуры выше 77 K значения R_H сохраняют свой отрицательный знак, что объясняется увеличением концентрации электронов в образцах p -типа. Поскольку подвижность электронов гораздо больше, чем подвижность дырок, это позволяет при меньшей их концентрации получать отрицательные значения R_H .

В кристаллах $(\text{3HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ подвижность электронов уменьшается при увеличении температуры, что указывает на преобладание рассеяния носителей заряда на тепловых колебаниях кристаллической решетки.

Коэффициент термо-эдс α всех образцов имеет отрицательные значения, которые возрастают по абсолютной величине при повышении тем-

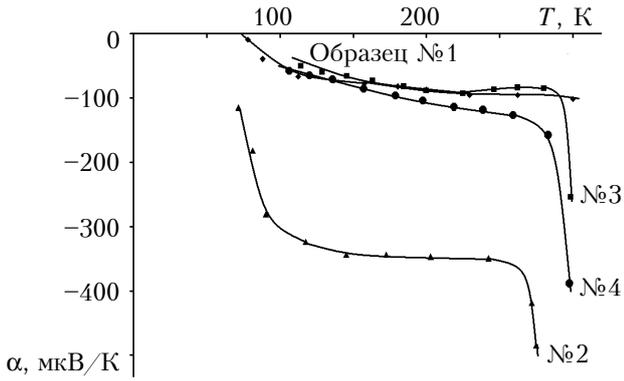


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента термо-эдс от температуры для четырех исследуемых образцов кристаллов $(3\text{HgTe})_{0,5}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_{0,5}:\langle\text{Mn}\rangle$

пературы (рис. 4). Это связано с ростом концентрации электронов при росте температуры и увеличением их вклада в величину коэффициента термо-эдс.

Оптические свойства кристаллов $(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$

Исследовали два образца кристаллов $(3\text{HgTe})_{0,5}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_{0,5}:\langle\text{Mn}\rangle$, имеющих разную концентрацию электронов. Для определения коэффициента поглощения $\alpha_{\text{оп}}$ использовался метод, основанный на независимом измерении коэффициентов отражения R и пропускания t .

Спектральные зависимости $\alpha_{\text{оп}} = f(h\nu)$ для исследуемых кристаллов, полученные при использовании формулы [8]

$$\alpha_{\text{оп}} = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{2t} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4t^2} + R^2} \right], \quad (3)$$

были пересчитаны в зависимости $\alpha_{\text{оп}}^2 = f(h\nu)$ при температуре 300 К. Наличие на графиках этой зависимости прямолинейного участка (рис. 5) указывает на то, что в исследуемых

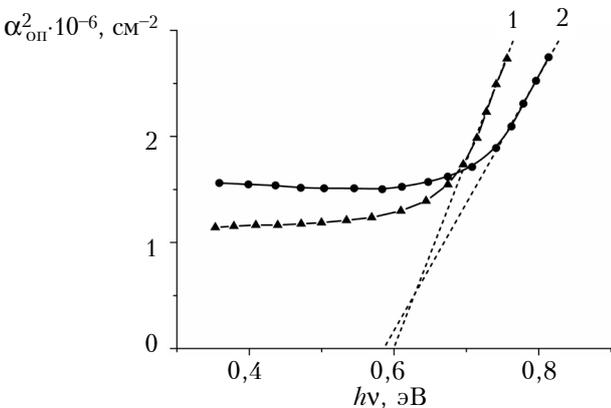


Рис. 5. Спектральная зависимость $\alpha_{\text{оп}}^2 = f(h\nu)$ при $T=300\text{ К}$ для образцов кристаллов $(3\text{HgTe})_{0,5}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_{0,5}:\langle\text{Mn}\rangle$ с различной концентрацией электронов: 1 – $N_n \approx 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; 2 – $N_n \approx 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

кристаллах при $T=300\text{ К}$ имеют место прямые разрешенные межзонные оптические переходы.

Экстраполяцией линейных участков зависимости $\alpha_{\text{оп}}^2 = f(h\nu)$ к $\alpha_{\text{оп}}^2 = 0$ (рис. 5) определили величину оптической запрещенной зоны $E_g^{\text{оп}}$ при $T = 300\text{ К}$: $E_g^{\text{оп}} \approx 0,6\text{ эВ}$ для образца с $N_n \approx 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $E_g^{\text{оп}} \approx 0,58\text{ эВ}$ для образца $N_n \approx 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Зонные параметры кристаллов $(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$

Хорошим приближением для количественного описания полученных нами результатов является закон дисперсии, полученный Кейном для InSb [9–11]:

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} - \frac{E_g}{2} \left\{ 1 - \sqrt{1 + \frac{8}{3} \frac{k^2 P^2}{E_g^2}} \right\}, \quad (4)$$

который является частным случаем неквадратичного закона дисперсии

$$\frac{1}{m_{\xi}^*} = \frac{1}{\hbar^2 k} \frac{\partial E(k)}{\partial k}, \quad (5)$$

- где \hbar – постоянная Дирака;
- k – волновой вектор;
- m_0 – масса свободного электрона;
- P – матричный элемент межзонного взаимодействия;
- m_{ξ}^* – эффективная масса электрона на уровне Ферми.

Проведенные исследования кинетических коэффициентов и расчеты позволяют определить зонные параметры образцов при $T = 300\text{ К}$.

Значения эффективной массы электронов на уровне Ферми для области температур 130–300 К рассчитывали с учетом вырождения электронного газа в исследуемых кристаллах, сферической симметрии поверхности постоянной энергии носителей заряда, непараболического закона дисперсии. При этом также использовали значения σ , R_H , коэффициента термо-эдс в нулевом магнитном поле $\alpha(0)$ и изменение коэффициента термо-эдс под действием магнитного поля (напряженностью $H = 5\text{ кЭ}$) $\Delta\alpha = \alpha(H) - \alpha(0)$ [9] (полученные из усредненных экспериментальных зависимостей $\sigma = f(T)$, $R_H = f(T)$, $\alpha(0) = f(T)$, $\Delta\alpha = f(T)$). Расчет проводили по формуле [9–11]

$$m_{\xi}^* = \frac{\alpha(0)(3\pi^2 n)^{2/3} e \hbar^2}{T(1 + \gamma_r) k_B^2 \pi^2}. \quad (6)$$

Полученные отсюда значения m_{ξ}^* хорошо согласуются с рассчитанными по формуле [9–11]

$$m_{\xi}^* = \frac{e \hbar^2}{k_B^2 T} \left(\frac{3}{\pi} \frac{1}{e R_{\infty}} \right)^{2/3} \alpha_{\infty}, \quad (7)$$

которая справедлива и в случае неупругого рассеяния электронов [12]. (Здесь R_{∞} , α_{∞} – коэффициенты R и α , измеренные в сильном магнитном поле).

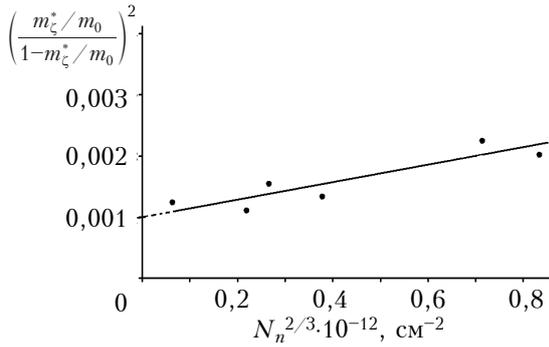


Рис. 6. Концентрационная зависимость эффективной массы электронов на уровне Ферми кристаллов $(\text{3HgTe})_{0,5}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_{0,5}:\langle\text{Mn}\rangle$ при $T = 300 \text{ K}$

Зависимость эффективной массы электронов на уровне Ферми от их концентрации была получена путем ее определения в образцах $(\text{3HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ одинакового состава x с одинаковым содержанием марганца, но с разной концентрацией электронов N_n . Полученная таким образом зависимость (для $T = 300 \text{ K}$) имеет линейный характер (рис. 6), что соответствует Кейновскому закону дисперсии.

Экстраполяцией этой зависимости к $N_n = 0$ получаем эффективную массу электрона на дне зоны проводимости, которая при использовании формулы [10]

$$\left(\frac{m_\xi^*/m_0}{1 - m_\xi^*/m_0}\right)^2 = 32,5 \cdot 10^{-32} \frac{E_g^2}{P^4} + 8,27 \cdot 10^{-30} \frac{N_n^{2/3}}{P^2} \quad (8)$$

позволяет определить $|E_g|$ (при $N_n = 0, m_\xi^* = m_0^*$). Значение P^2 находим по тангенсу угла наклона графика этой зависимости.

На основе кинетических исследований с помощью вышеприведенной методики получены следующие значения зонных параметров: ширина запрещенной зоны (энергетическое расстояние между уровнями Γ_6 и Γ_8) $E_g \approx 0,4 \text{ эВ}$, матричный элемент межзонного взаимодействия $P = 8,4 \cdot 10^{-8} \text{ эВ}\cdot\text{см}$, эффективная масса электрона на дне зоны проводимости $m_0^*/m_0 = 0,03$.

Таким образом, зонные параметры образца с $N_{\text{Mn}} = 1,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_n = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ следующие: $E_g \approx 0,4 \text{ эВ}$; $E_g^{\text{оп}} \approx 0,6 \text{ эВ}$ и энергия уровня Ферми $E_F = \zeta \approx 0,13 \text{ эВ}$, оценка которого проведена по формуле [9 – 11]

$$E_F = \zeta = \frac{E_g}{2} \left(\frac{m_\xi^*}{m_0^*} - 1 \right). \quad (9)$$

Зонные параметры образца с $N_{\text{Mn}} = 1,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_n = 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ такие: $E_g \approx 0,4 \text{ эВ}$; $E_g^{\text{оп}} \approx 0,58 \text{ эВ}$ и энергия уровня Ферми $E_F = \zeta \approx 0,21 \text{ эВ}$. Схема его зонной структуры, построенная на их основе, изображена на рис. 7 для $T = 300 \text{ K}$. Здесь

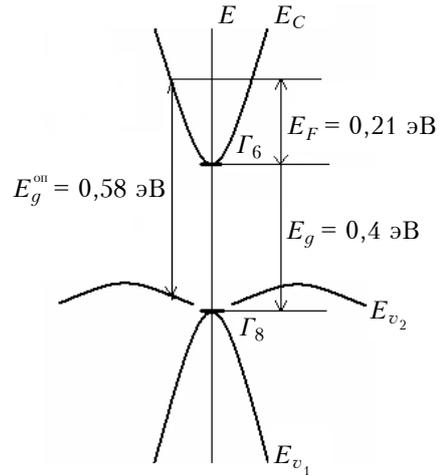


Рис. 7. Схема зонной структуры и энергетические параметры кристалла $(\text{3HgTe})_{0,5}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_{0,5}:\langle\text{Mn}\rangle$ ($N_{\text{Mn}} = 1,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_n = 6,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) при $T = 300 \text{ K}$ (E_C – зона проводимости; E_{v1} – зона легких дырок; E_{v2} – зона тяжелых дырок)

видно, что зонные параметры хорошо согласуются между собой. Следует отметить, что поскольку для этого образца вырождение электронного газа сильнее, то и его зонные параметры были определены более точно.

Гетероструктуры $n\text{-TiO}_2/(\text{3HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ и $n\text{-TiN}/(\text{3HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$

Для формирования гетеропереходов пленки TiO_2 и TiN наносили на свежеисколотые подложки монокристаллов $(\text{3HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ (типоразмер $7 \times 7 \times 1,5 \text{ мм}$) в универсальной вакуумной установке Laybold-Heraeus L560 с помощью реактивного магнетронного распыления мишени из чистого титана в атмосфере смеси аргона и кислорода для пленок TiO_2 и в атмосфере смеси аргона и азота для пленок TiN при постоянном напряжении.

Омические контакты к гетероструктурам формировали методом термического осаждения индия при температуре подложки 150°C .

Измерение вольт-амперных характеристик гетеропереходов $n\text{-TiO}_2/(\text{3HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ и $n\text{-TiN}/(\text{3HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ при комнатной температуре показало, что исследуемые гетеропереходы не обладают выпрямительными свойствами. Это может быть обусловлено высокой концентрацией электронов в базовой области гетероперехода. Известно, что область пространственного заряда и ее толщина обратно пропорциональны концентрации носителей заряда. Поскольку их концентрация высока, область пространственного заряда узкая и, соответственно, электроны могут свободно туннелировать через нее.

Выводы

Проведенные исследования магнитных, кинетических и оптических свойств образцов кристаллов $(\text{ZnHgTe})_{0,5}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_{0,5}:\langle\text{Mn}\rangle$ показали следующее.

1. Особенности магнитных свойств кристаллов обусловлены наличием в них кластеров типа $\text{Mn}-\text{Te}-\text{Mn}-\text{Te}$, в которых между атомами Mn через атомы теллура осуществляется косвенное обменное взаимодействие антиферромагнитного характера.

2. Температурная зависимость электропроводности образцов имеет полупроводниковый характер, а температурная зависимость коэффициента Холла указывает на смешанный тип проводимости кристаллов. Термо-эдс в кристаллах ($\alpha < 0$) увеличивается по абсолютной величине с ростом температуры.

3. Оптические исследования показали наличие в образцах прямых межзонных оптических переходов, а величина оптической запрещенной зоны при 300 К составляет примерно 0,6 эВ.

4. Изготовленные авторами гетеропереходы $n\text{-TiO}_2/(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ и $n\text{-TiN}/(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ не обладают выпрямительными свойствами.

Таким образом, можно сделать вывод, что кристаллы твердых растворов $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, легированных марганцем, относятся к полумагнитным полупроводникам и могут быть использованы для создания приборов спинтроники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Furdyna J.K., Diluted Magnetic Semiconductors // J. Appl. Phys. – N 64 (4). – 1988. – P. 29–64.
2. Мар'янчук П.Д., Козьярський Д.П., Майструк Е.В., Димко Л.М., Козьярський І.П. Фізичні явища в кристалах

$(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, $(\text{ZnHgSe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Se}_3)_x$, $(\text{ZnHgS})_{1-x}(\text{Al}_2\text{S}_3)_x$, легований марганцем // Нові технології. – Т. 19, № 1. – 2008. – С. 45–51

3. Мар'янчук П.Д., Майструк Э.В. Гигантское магнитосопротивление в кристаллах $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Fe}_y\text{Te}$ // Изв. Вузов. Физика. – 2007. – Т. 50, № 10. – С. 29–34.

4. Твердые растворы в полупроводниковых системах: Справочник. – Москва: Наука, 1978.

5. Koziarski I.P., Marianchuk P.D. and Maistruk E.V. Optical properties of $(\text{ZnHgSe})_{0,5}(\text{In}_2\text{Se}_3)_{0,5}$ crystals doped with Mn or Fe // Ukr. J. Phys. Opt. – 2011. – Vol. 12, N 3. – P. 137–142.

6. Мар'янчук П.Д., Майструк Э.В. Влияние термообработки в парах серы и ртути на магнитную восприимчивость кристаллов $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{S}_y$ // Неорганические материалы. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 549–554. DOI: 10.1134/S0020168508050087

7. Ковалюк Т.Т., Майструк Э. В., Мар'янчук П. Д. Магнитные, кинетические и оптические свойства кристаллов $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Dy}_y\text{Te}$ // Неорганические материалы. – 2013. – Т. 49, № 5. – С. 468–472. DOI: 10.1134/S0020168513050051

8. Уханов Ю. И. Оптические свойства полупроводников. – Москва: Наука, 1977.

9. Мар'янчук П.Д., Гавалешко Н.П. Влияние температуры на зонную структуру $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$ // Изв. вузов. Физика. – 1991. – Т. 34, № 4. – С. 40–44. DOI: 10.1007/BF00898093

10. Цидильковский И.М. Электроны и дырки в полупроводниках. – Москва: Наука, 1972.

11. Аскеров Б.М. Электронные явления переноса в полупроводниках. – Москва: Наука, 1985.

12. Dietl T. Jędrzejczak A. Temperature dependence of the band structure parameters in HgSe from thermomagnetic measurements // Phys. Stat. Sol. (b). – 1975. – Vol. 71. – K39-K44.

Дата поступления рукописи
в редакцию 20.03 2014 г.

П. Д. МАР'ЯНЧУК, Л. М. ДИМКО, Т. Р. РОМАНИШИН,
Т. Т. КОВАЛЮК, В. В. БРУС, М. М. СОЛОВАН, А. І. МОСТОВИЙ

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
E-mail: p.maryanchuk@chnu.edu.ua

ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І ЗОННА СТРУКТУРА КРИСТАЛІВ $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, ЛЕГОВАНИХ МАРГАНЦЕМ

В результаті досліджень магнітних, кінетичних і оптичних властивостей кристалів $(\text{ZnHgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ ($x=0,5$) встановлено, що в них мають місце прямі міжзонні оптичні переходи. Температурна залежність електропровідності зразків має напівпровідниковий характер, а температурна залежність коефіцієнта Холла свідчить про змішаний тип провідності. Особливості магнітних властивостей обумовлені наявністю в кристалах кластерів типу $\text{Mn}-\text{Te}-\text{Mn}-\text{Te}$, в яких між атомами Mn через атоми халькогена здійснюється опосередкована обмінна взаємодія антиферромагнітного характеру. Визначено зонні параметри і побудовано схему зонної структури для кристалів з концентрацією атомів марганцю приблизно 10^{20} см^{-3} .

Ключові слова: кристал, магнітна сприйнятливність, кластер, електропровідність.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2-3.54
UDC 621.315.592

P. D. MARYANCHUK, L. N. DYMKO,
T. R. ROMANISHYN, T. T. KOVALYUK,
V. V. BRUS, M. N. SOLOVAN, A. I. MOSTOVOY

Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
E-mail: p.maryanchuk@chnu.edu.ua

PHYSICAL PROPERTIES AND BAND STRUCTURE OF CRYSTALS $(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, DOPED WITH MANGANESE

This paper presents the results of the analysis of magnetic, optical, kinetic properties and band parameters of $(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$ crystals doped by manganese. The behavior of the magnetic susceptibility of the $(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ crystals can be explained by the presence of Mn–Te–Mn–Te clusters or, more precisely, by their transition from a magnetically ordered to a paramagnetic state at Curie temperature T_C . The temperature dependences of electrical conductivity are typical for semiconductor materials. This is due to the increase in carrier concentration with the increase of temperature. The temperature dependence of the Hall coefficient indicates that electrons and holes participate in the transport phenomena in the studied samples (the conductivity is mixed). In $(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ crystals, the electron mobility decreases with increasing temperature, indicating the predominance of the scattering of the charge carriers on thermal vibrations of the crystal lattice. Thermoelectric power for the samples under investigation possesses negative values and increases in absolute value with the rise of temperature. The optical band gap of the samples was defined from the optical studies. We have measured current-voltage characteristics of $n\text{-TiO}_2/(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ and $n\text{-TiN}/(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x:\langle\text{Mn}\rangle$ heterojunctions at room temperature.

The band gap, the matrix element of the interband interaction and the electron effective mass at the bottom of the conduction band were determined from the concentration dependence of the electrons effective mass at the Fermi level.

Keywords: crystal, magnetic susceptibility, cluster, electric conductivity.

REFERENCES

1. Furdyna J.K. Diluted magnetic semiconductors. *J. Appl. Phys.*, no 64(4), 1988, pp. 29-64.
2. Maryanchuk P.D., Koziarskyi D.P., Maistruk E.V., Dymko L.M., Koziarskyi I.P. [Physical phenomena in crystals $(3\text{HgTe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Te}_3)_x$, $(3\text{HgSe})_{1-x}(\text{Al}_2\text{Se}_3)_x$, $(3\text{HgS})_{1-x}(\text{Al}_2\text{S}_3)_x$, doped by manganese]. *Novi tekhnologiyi*, vol. 19, no 1, 2008, pp. 45-51. (in Ukrainian)
3. Maryanchuk P.D., Maistruk E. V. Giant magneto-resistance in $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Fe}_y\text{Te}$ crystals. *Russian Physics Journal*, 2007, vol. 50, no 10, pp. 985-992. DOI: 10.1007/s11182-007-0143-z
4. *Tverdye rastvory v poluprovodnikovyykh sistemakh: Spravochnik* [Solid solutions in semiconductor systems. Handbook]. Moscow, Nauka, 1978, 188 p. (in Russian)
5. Koziarskyi I.P., Maryanchuk P.D., Maistruk E.V. Optical properties of $(3\text{HgSe})_{0.5}(\text{In}_2\text{Se}_3)_{0.5}$ crystals doped with Mn or Fe. *Ukr. J. Phys. Opt.*, 2011, no 3, vol. 12, pp. 137-142.
6. Maryanchuk P.D., Maistruk E.V. Effect of heat treatment in sulfur and mercury vapors on the magnetic susceptibility of $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{1-y}\text{S}_y$. *Inorganic Materials*, 2008, no 44(5), pp. 475-480. DOI: 10.1134/S0020168508050087
7. Kovalyuk T.T., Maistruk E.V., Maryanchuk P.D. Magnetic, optical, and kinetic properties of $\text{Hg}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Dy}_y\text{Te}$ crystals. *Inorganic Materials*, 2013, vol. 49, no 5, pp.445-449. DOI: 10.1134/S0020168513050051
8. Uhanov Yu.I. [Optical properties of semiconductors], Moscow, Nauka, 1977, 368 p. (in Russian)
9. Maryanchuk P. D., Gavaleshko N.P. Effect of temperature on the band structure of $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Se}$. *Soviet Physics Journal*, 1991, vol. 34, no 4, pp. 312-315. DOI: 10.1007/BF00898093].
10. Tsydykovskiy I.M. *Elektrony i dyrki v poluprovodnikakh* [Electrons and holes in semiconductors]. Moscow, Nauka, 1972, pp. 472. (in Russian)
11. Askerov B.M. *Elektronnyye yavleniya perenosa v poluprovodnikakh* [Electron transport phenomena in semiconductors]. Moscow, Nauka, 1985, pp. 320. (in Russian)
12. Dietl T., Jędrzejczak A. Temperature dependence of the band structure parameters in HgSe from thermomagnetic measurements. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 1975, vol. 71, K39-K44.

Д. т. н. Н. М. ВАКИВ¹, д. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ¹, к. т. н. С. Ю. ЛАРКИН²,
А. Ю. АВКСЕНТЬЕВ², Р. С. КРУКОВСКИЙ²

Украина, г. Львов, ¹Научно-производственное предприятие «Карат»; г. Киев, ²НПК «Наука»
E-mail: carat207@i.ua

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗКИХ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ p^+ -AlGaAs/ n -GaAs МЕТОДОМ МОС-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ

Разработан способ формирования качественных гетерограниц в системе p^+ -AlGaAs/ n -GaAs методом МОСVD в условиях непрерывного роста при изменении температуры кристаллизации от 600 до 760°C. Установлено, что режим формирования слоя твердого раствора p^+ -AlGaAs:Zn на поверхности слоя n -GaAs:Si при повышении температуры в указанном интервале со скоростью 8–10°C/мин позволяет получить резкую границу раздела между слоями p - и n -типа проводимости. Такой способ формирования резких гетерограниц в системах p -GaAs:Zn/ n -GaAs:Si может быть использован для изготовления широкой номенклатуры эпитаксиальных структур.

Ключевые слова: эпитаксиальный слой, арсенид галлия, МОС-гидридная эпитаксия, гетерограница, редкоземельный элемент, легирование.

В последние годы технология газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений при пониженном давлении (МОС-гидридная эпитаксия) является основным промышленным технологическим методом получения самых разнообразных эпитаксиальных гетероструктур соединений A_3B_5 , применяемых для изготовления сверхъярких светодиодов, инжекционных лазеров, СВЧ-приборов, фотоэлектрических tandemных преобразователей солнечной энергии с нано- и квантоворазмерными активными областями и ряда других полупроводниковых приборов [1, 2].

МОС-гидридная эпитаксия по сравнению с другими методами эпитаксиальной технологии обладает такими преимуществами, как гибкие условия для создания гетероперехода с нужными характеристиками, высокая чистота и однородность выращиваемых слоев по толщине и составу, высокая скорость и селективность роста, относительная простота конструкции реактора, высокая производительность, возможность контроля процесса роста *in situ* [3]. С помощью МОС-гидридной эпитаксии можно получать гетероструктуры, в которых практически отсутствуют дефекты кристаллической структуры — дислокации, дефекты упаковки, включения второй фазы.

Однако для данного метода характерен и ряд недостатков. До конца не выяснены механизмы вхождения в эпитаксиальные слои некоторых фоновых и легирующих примесей [4, 5]. Наибольшие проблемы возникают при формировании резких p – n -переходов в случае легирования одного из слоев сильнодиффундирующими примесями.

Один из способов формирования резкого профиля распределения легирующих примесей в слоях GaAs n - и p -типа проводимости базируется на использовании химических элементов, которые обладают низким коэффициентом диффузии (Si — донор, С — акцептор). Однако использование в качестве акцепторной примеси углерода не всегда оправданно, поскольку химические соединения, содержащие атомы С, в процессе пиролиза образуют химически активные соединения, вступающие в реакцию с кристаллизуемым эпитаксиальным слоем. То есть наблюдается конкуренция двух процессов — наращивание слоя и его травление летучими хлоридами галлия [6]. Уровень легирования слоя, как и скорость травления, возрастает при увеличении расхода четыреххлористого углерода [7]. Увеличение же температуры роста сопровождается, наоборот, уменьшением уровня легирования слоев из-за более интенсивного разложения арсина с образованием атомарного водорода. Водород интенсивно связывает на поверхности арсенида галлия углерод, уменьшая его количество в эпитаксиальном слое. Для стабилизации границы раздела при использовании четыреххлористого водорода важным становится выбор оптимальной температуры пиролиза. Высокого уровня легирования GaAs углеродом (10^{18} – 10^{19} см⁻³) можно достичь при низких температурах кристаллизации (менее 600°C). С точки зрения кристаллизации структурно совершенных слоев GaAs с низкой концентрацией фоновых примесей оптимальным является температурный диапазон 600–700°C [8], а для твердых растворов AlGaAs — диапазон 730–780°C [9]. Поэтому при формировании гетерограниц GaAs/AlGaAs

температуру подложки после наращивания слоя GaAs необходимо поднимать на 50–100°C, а может, и больше. Остановка роста слоя во время повышения температуры значительно ухудшает границу раздела слоев вследствие образования безызлучательных центров рекомбинации и размывания профиля легирующих примесей в ранее кристаллизованных слоях.

Целью настоящей работы является получение методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении структур p -GaAs(AlGaAs)/ n -GaAs с резкой границей раздела, которые формируются акцепторной примесью (цинком) и амфотерным кремнием, и исследование их свойств.

Технологическая база МОС-гидридной эпитаксии для получения полупроводниковых структур A_3B_5

Учитывая мировые тенденции развития современной технологической базы микроэлектроники, НПК «Наука» (г. Киев) и НПП «Карат» (г. Львов) совместно организовали и впервые в Украине успешно запустили в работу первый участок МОС-гидридной эпитаксии на базе промышленной автоматизированной установки Discovery 180 LDM (США) для выращивания эпитаксиальных структур (рис. 1).

Участок имеет всю необходимую инфраструктуру, включая чистые помещения, системы очистки и подачи технологических газов, высо-

коэффициентные системы утилизации отходов и обеспечения безопасности производства.

Установка МОС-гидридной эпитаксии Discovery 180 LDM предназначена для наращивания всего номенклатурного ряда эпитаксиальных структур, в том числе наноразмерных, на основе соединений A_3B_5 . На базе таких структур может быть развернуто производство современных полупроводниковых оптоэлектронных приборов (светодиодов красного и оранжевого спектра излучения, фотодиодов, чувствительных в диапазоне 400–3500 нм, инжекционных гетеролазеров), СВЧ-приборов и др.

При одновременной загрузке шести двухдюймовых подложек на установке можно выпускать 480–500 эпитаксиальных гетероструктур в месяц, что соответствует примерно 1 млн чипов площадью 1 мм².

Особенности технологического процесса МОС-гидридной эпитаксии

Эпитаксиальные слои GaAs и AlGaAs, легированные, соответственно, кремнием и цинком, выращивали на описанной выше установке в реакторе с горизонтально расположенным подложкодержателем, вращающимся с круговой скоростью около 900 об/мин. В качестве подложек использовали полуизолирующий GaAs с кристаллографической ориентацией (100) и (111). Температура подложек изменялась в пределах 600–760°C. Давление в реакторе составляло 70 Торр. В качестве исходных реагентов использовали триметилгаллий (TMGa), триметилалюминий (TMAI) и арсин AsH₃. Источником легирующих элементов кремния и цинка служили, соответственно, дисилан (200 ppm Si₂H₆ в водороде) и диметилцинк (DEZn). Испаритель с DEZn помещали в термостат, где поддерживалась температура 17±1°C. В качестве газа-носителя для переноса компонентов газовой смеси в реактор установки использовали водород с точкой росы не выше –100°C. Поддержание расхода газовых смесей осуществлялось с точностью ±2%. После того как температура подложки достигала 450°C, в реактор начинали подавать арсин в количестве 3,0·10⁻⁴ моль/мин для предупреждения термодорожжания. Скорость кристаллизации слоев GaAs и AlGaAs составляла 20–22 и 23–25 нм/мин соответственно. Отношение содержания в газовой фазе элементов пятой группы к содержанию элементов третьей при кристаллизации слоев n -GaAs:Si и p -Al_{0,3}Ga_{0,7}As:Zn, было равно 180 и 200 соответственно.

В слоях GaAs и AlGaAs экспериментально определялся тип проводимости, концентрация и подвижность основных носителей заряда по результатам измерений ЭДС Холла в геометрии Ван дер Пау на установке NMS3000. Профиль распределения концентрации основных носителей по толщине слоев и в эпитаксиальных структурах GaAs/AlGaAs измеряли с применением контролируемого травления на



Рис. 1. Установка МОС-гидридной эпитаксии Discovery 180 LDM

C – V-профилометре Ascent. Однородность состава твердых растворов по поверхности оценивали с использованием фотолуминесцентного картографа PLM-metr 2000 rpm.

Результаты исследований

Свойства резких границ раздела p -AlGaAs/ n -GaAs, формируемых акцепторной примесью (цинком) и амфотерным кремнием, исследовали при низком и высоком уровне легирования цинком (соответственно $(2-3) \cdot 10^{17}$ и более чем $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) эпитаксиальных слоев p -AlGaAs.

Если уровень легирования эпитаксиальных слоев p -Al_{0,3}Ga_{0,7}As цинком был ниже $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2, кривая 1), то эффект размывания границы раздела между слоями GaAs (AlGaAs) p - и n -типа проводимости проявлялся в уменьшении концентрации электронов в части слоя n -GaAs, соприкасающейся со слоем p -AlGaAs (рис. 2, кривая 2). Уменьшение концентрации электронов в пограничном слое n -GaAs можно объяснить диффузией цинка из p -Al_{0,3}Ga_{0,7}As:Zn и частичной компенсацией донорной примеси (кремния) в n -GaAs в предположении того, что концентрация электрически неактивного цинка в p -GaAs превышает уровень $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Коэффициент диффузии, определенный с учетом этого значения концентрации цинка, составляет около $2 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \cdot \text{с}$.

При наращивании двухслойной эпитаксиальной структуры p^+ -Al_{0,3}Ga_{0,7}As:Zn/ n -GaAs:Si, где концентрация цинка в p^+ -слое на порядок больше, чем в слое p -Al_{0,3}Ga_{0,7}As, а концентрация кремния в n -слое соответствует уровню $(2-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, наблюдается эффект полной перекомпенсации слоя n -GaAs:Si (рис. 2, кривая 3) акцепторной примесью – цинком. Таким образом, повышение уровня легирования слоев p -Al_{0,3}Ga_{0,7}As цинком при последовательном наращивании n - и p -слоев может при-

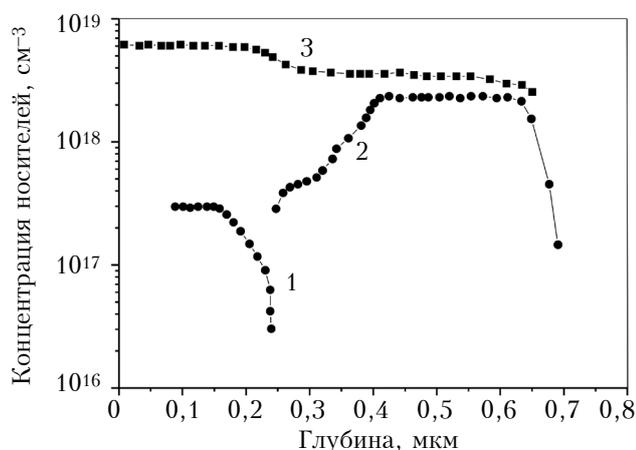


Рис. 2. Профили распределения концентрации носителей в слоях эпитаксиальной структуры p^+ -Al_{0,3}Ga_{0,7}As:Zn/ n -GaAs:Si, полученных при расходе Si₂H₆ (200 ppm в H₂) $3,7 \cdot 10^{-8}$ моль/мин (2) и расходе DEZn $2,8 \cdot 10^{-5}$ (1) и $2,6 \cdot 10^{-3}$ (3) моль/мин

водить не только к размыванию границы раздела, но и к образованию сплошного слоя p -типа проводимости.

Возможны два варианта решения проблемы получения качественных гетерограниц. Во-первых, это формирование промежуточного нелегированного слоя GaAs (AlGaAs) определенной толщины перед кристаллизацией сильнолегированного слоя p -типа проводимости. Толщина такого слоя определяется с учетом значения коэффициента диффузии цинка при выбранных температурах эпитаксии. Во-вторых, это выбор оптимальной температуры кристаллизации слоев. Как сообщалось выше, ее значения для GaAs и AlGaAs отличаются. Особенно важную роль этот параметр играет при формировании эпитаксиальных структур на подложках с кристаллографической ориентацией (111). Поэтому целесообразно проводить кристаллизацию при оптимальной для каждого слоя температуре. В методе МОС-гидридной эпитаксии процесс перехода от одной температуры роста к другой сопровождается остановкой роста и выдержкой поверхности формируемого слоя в атмосфере разлагающегося арсина. Длительная остановка роста может стимулировать неконтролируемое легирование углеродом выращенного слоя и способствовать повышению концентрации структурных дефектов на границе раздела, а также инициировать размывание профиля легирующих примесей в ранее кристаллизованных слоях.

Оптимальное решение проблемы получения резкой гетерограницы базируется на экспериментально полученной зависимости концентрации дырок в слоях Al_xGa_{1-x}As от температуры кристаллизации, которая приведена на рис. 3. Ее характерной особенностью является обратно пропорциональная связь между концентрацией дырок в слое AlGaAs и температурой кристаллизации. Этот эффект является чрезвычайно важным, поскольку при фиксированном расходе

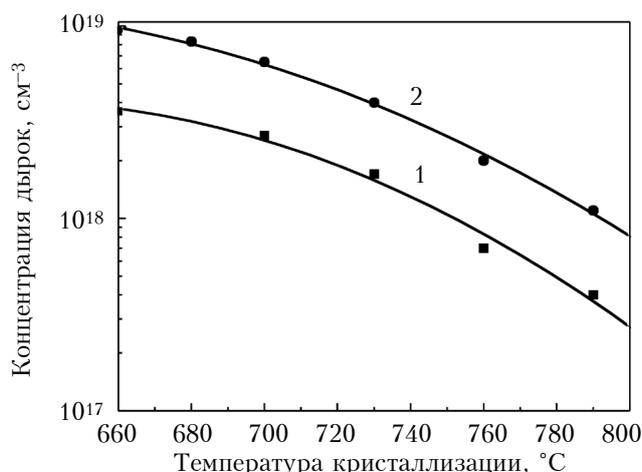


Рис. 3. Зависимость концентрации дырок в слоях Al_xGa_{1-x}As:Zn ($x=0,1-0,4$) от температуры кристаллизации при различных потоках DEZn: 1 – $2,8 \cdot 10^{-5}$ моль/мин; 2 – $2,6 \cdot 10^{-3}$ моль/мин

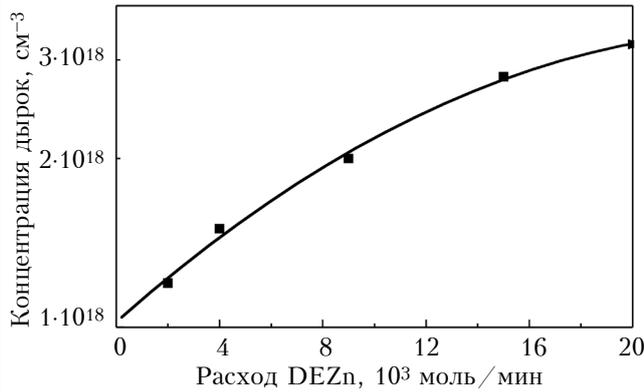


Рис. 4. Зависимость концентрации дырок в твердых растворах от расхода лигатуры DEZn при температуре кристаллизации 750°C

диэтилцинка, изменяя температуру подложки в относительно небольшом интервале — с 680 до 760°C, можно достичь уменьшения концентрации дырок примерно в пять раз, тогда как при увеличении расхода диэтилцинка DEZn в 10 раз (с 2 до 20 моль/мин) при температуре эпитаксии 700°C концентрация дырок в твердых растворах возрастает не более чем в 3 раза (рис. 4).

Эффект anomalно высокой чувствительности уровня легирования слоев AlGaAs акцепторной примесью (цинком) к температуре кристаллизации может быть использован для эффективного управления профилем распределения легирующих примесей в *n-p*-эпитаксиальных структурах. Это идеально согласуется с оптимальными условиями кристаллизации в системе GaAs/AlGaAs. Известно, что наиболее структурно совершенные слои GaAs с минимальной концентрацией фоновой примеси, определяемой на основе холловских измерений, кристаллизуются в температурном диапазоне 600–700°C, а твердые растворы AlGaAs — в диапазоне 730–780°C [10]. Для формирования качественной гетерограницы наращивание бинарного соединения и его твердого раствора желательно проводить при разных температурах, но в условиях непрерывного роста слоев.

На основе приведенной на рис. 3 зависимости был разработан способ формирования резкой гетерограницы GaAs/AlGaAs без остановок роста. Согласно этому способу слой *n*-GaAs, легированный кремнием, формируется при оптимальной постоянной температуре из диапазона 650–670°C. Далее наращивается нелегированный слой AlGaAs минимальной толщины (30–40 нм), который используется в качестве буфера, предотвращающего диффузию цинка в нижележащий слой *n*-GaAs из сильнолегированного слоя *p*-типа проводимости.

За время формирования нелегированного слоя AlGaAs в течение примерно 60 с скорость роста температуры подложкодержателя увеличивается от 0 до 8–10°C/мин, после чего включается подача диэтилцинка и начинается фор-

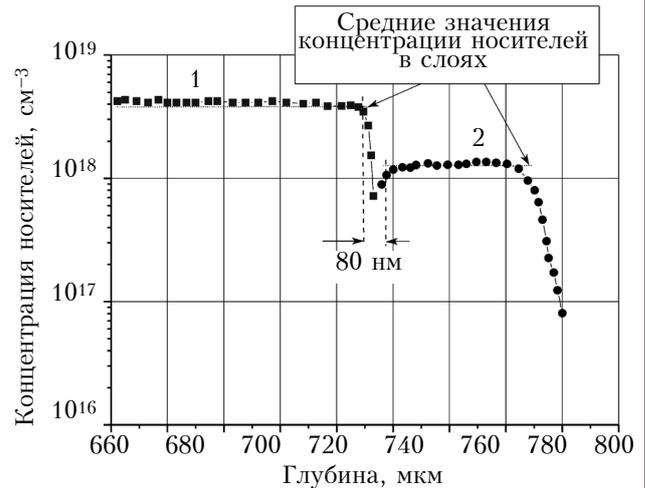


Рис. 5. Профили распределения концентрации носителей в структуре *p*⁺-Al_{0,3}Ga_{0,7}As:*n*-GaAs:Si, кристаллизованной при повышении температуры подложки в процессе роста *p*⁺-слоя:

- 1 — *p*⁺-Al_{0,3}Ga_{0,7}As:Zn (расход DEZn 2,6·10⁻³ моль/мин);
- 2 — *n*-GaAs:Si (расход дисилана 3,7·10⁻⁸ моль/мин)

мирование слоя *p*-AlGaAs. Поскольку температура подложек постоянно растет, то согласно зависимости, приведенной на рис. 3, концентрация дырок, а значит, и акцепторной примеси цинка в эпитаксиальных слоях будет уменьшаться вплоть до остановки нагрева реактора. Температура подложки возрастает на 50–80°C, а затем фиксируется при определенном значении (740–750°C) вплоть до окончания процесса кристаллизации слоя *p*-AlGaAs. За время кристаллизации легирующая примесь (Zn) равномерно распределяется в тонком буферном нелегированном слое, а также по толщине слоя *p*-AlGaAs, обеспечивая образование резкого профиля распределения на границе раздела слоев *n*- и *p*-типа проводимости, о чем свидетельствуют результаты измерения профилей концентрации электронов и дырок (рис. 5), полученные с использованием *C-V*-профилометрии. Переходная область составляет около 80 нм. Ее определяли между крайними значениями концентраций *n*- и *p*-областей вблизи границы раздела, которые отличаются от среднего значения в слое не более чем на 5%.

Выводы

Таким образом, отработанные технологические режимы позволили сформировать методом МОС-гидридной эпитаксии резкие гетерограницы *p*⁺-GaAs:Zn/*n*-GaAs:Si с переходными областями около 80 нм при уровнях легирования цинком более 4·10¹⁸ см⁻³ и температуре кристаллизации в диапазоне 600–780°C. Полученный результат достигнут за счет использования обратно пропорциональной зависимости концентрации дырок в слоях GaAs (AlGaAs) от температуры кристаллизации в указанном диапазоне и применения режима повышения температуры

подложки со скоростью $8-10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в процессе формирования слоя $p^+-\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$.

Разработанный способ формирования резких гетерограниц в системах $p\text{-GaAs:Zn}/n\text{-GaAs:Si}$ может быть использован для изготовления широкой номенклатуры эпитаксиальных структур

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Petrova-Koch V., Hezel R., Gotszberger A. High-efficient low cost photovoltaics. – Springer, 2009.

2. Dong J.R., Teng J.H., S.J. Chua, Foo B. C., Y.J. Wang, R. Yin. MOCVD growth of 980 nm InGaAs/GaAs/AlGaAs graded index separate confinement heterostructure quantum well lasers with tertiarybutylarsine // Journal of Crystal Growth. – 2006. – Vol. 289, iss. 1. – P. 59–62. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2005.10.138

3. Shastry S.K., Zemon S., Kenneson D.G., Lambert G. Control of residual impurities in very high purity GaAs grown by organometallic vapor phase epitaxy // Appl. Phys. Lett. – 1988. – Vol. 52, iss. 2. – P. 150. DOI: 10.1063/1.99034

4. Shunro Fuek, Masasi Umemura, Naoshi Yamada et al. Morphology of GaAs homoepitaxial layer grown on(111) A substrate planes by organometallic vapor phase deposition // Journal of Applied Physics. – 1990. – Vol. 68, iss. 1. – P. 97–100. DOI: 10.1063/1.347076

5. Masashi Umemura, Kazuhiro Kuwahara, Shunro Fuke et al. Morphology of AlGaAs layer grown on GaAs(111)A

substrate plane by organometallic vapor phase epitaxy // Journal of Applied Physics. – 1992. – Vol. 72, iss. 1. – P. 313. DOI: 10.1063/1.352141

6. Hanna M.C., Lu Z.H., Majerfeld A. Very high carbon incorporation in metalorganic vapor phase epitaxy of heavily doped p-type GaAs // Appl. Phys.Lett. – 1991. – Vol. 58, iss 2. – P. 164. DOI: 10.1063/1.104960

7. Watanabe N., Ito H. Saturation of hole concentration in carbon-doped GaAs grown by metalorganic chemical vapour deposition // J.C. Cryst. Growth. – 1997. – Vol. 182, iss. 1–2. – P. 30–36. DOI: 10.1016/S0022-0248(97)00333-3

8. Hanna M.C., Lu Z.H., Oh E.G., Mao E., Majerfeld A. Atmospheric pressure organometallic vapor phase epitaxy growth of high-mobility GaAs using trimethylgallium and arsine // Appl. Phys. Lett. – 1990. – Vol. 57, iss. 11. – P. 1120. DOI: 10.1063/1.103509

9. Мармалюк А.А. Закономерности образования трехкомпонентных твердых растворов в условиях МОС-гидридной эпитаксии // Материалы электронной техники. Известия вузов. – 2005. – № 1. – С. 17–23.

10. Мармалюк А.А. Легирование GaAs в условиях МОС-гидридной эпитаксии // Материалы электронной техники. Известия вузов. – 2004. – №3. – С. 14–18.

Дата поступления рукописи
в редакцию 28.04 2014 г.

М. М. ВАКІВ¹, С. І. КРУКОВСЬКИЙ¹, С. Ю. ЛАРКІН²,
А. Ю. АВКСЕНТЬЄВ², Р. С. КРУКОВСЬКИЙ²

Україна, м. Львів, ¹НВП «Карат»; м. Київ, ²НВК «Наука»
E-mail: carat207@i.ua

ФОРМУВАННЯ РІЗКИХ МЕЖ РОЗДІЛУ В ЕПІТАКСІЙНИХ СТРУКТУРАХ $p^+-\text{AlGaAs}/n\text{-GaAs}$ МЕТОДОМ МОС-ГІДРИДНОЇ ЕПІТАКСІЇ

Розроблено спосіб формування якісних гетеро меж в системі $p^+-\text{AlGaAs}/n\text{-GaAs}$ методом МОСVD в умовах безперервного вирощування при зростанні температури кристалізації від 600 до 760°C . Встановлено, що режим формування шару твердого розчину $p^+-\text{AlGaAs:Zn}$ на поверхні шару $n\text{-GaAs:Si}$ при підвищенні температури в зазначеному інтервалі зі швидкістю $8-10^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ дозволяє отримати різку межу розділу між шарами p - та n -типу провідності. Такий спосіб формування різких гетеро меж в системах $p\text{-GaAs:Zn}/n\text{-GaAs:Si}$ може бути використаний для виготовлення широкої номенклатури епітаксіальних структур.

Ключові слова: епітаксіальний шар, арсенід галію, МОС-гідридна епітаксія, гетеро межа, рідкоземельний елемент, легування.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2-3.61
UDC 621.315.592

N. M. VAKIV¹, S. I. KRUKOVSKII¹, S. Yu. LARKIN²,
A. Yu. AVKSENT'EV², R. S. KRUKOVSKII²

Ukraine, Lviv, ¹Scientific and production enterprise subsidiary enterprise “Karat”
JSC concern “Electron”;
Kiev, ²Scientific-production concern “Nauka”

E-mail: carat207@i.ua

SHARP INTERFACES IN $p^+-\text{AlGaAs}/n\text{-GaAs}$ EPITAXIAL STRUCTURES OBTAINED BY MOCVD

The complexity of forming sharp and high-quality boundaries in $p^+\text{AlGaAs}/n\text{-GaAs}$ systems by MOCVD method is caused by differing on $80-120^{\circ}\text{C}$ optimal crystallization temperature of GaAs layers and $n\text{-AlGaAs}$ solid solutions. A method of forming qualitative hetero boundaries under conditions of continuous growth at changing crystallization temperature from $600-700^{\circ}\text{C}$ has been developed. It has been determined that the crystallization of $p^+\text{-AlGaAs: Zn}$ solid solution layer on the surface of $n\text{-GaAs:Si}$ layer, with increasing the crystallization temperature in the temperature range of $600-760^{\circ}\text{C}$ at a rate $8-10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ allows to crystal-

lize sharp impurity boundary between the layers of p- and n-type conductivity. The method of forming sharp hetero boundaries in p-GaAs:Zn/n-GaAs:Si systems can be used for manufacturing wide range of epitaxial structures.

Keywords: epitaxial layer, gallium arsenide, MOCVD, heteroboundary, rare-earth element, doping.

REFERENCES

1. V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Gotszberger. *High-efficient low cost photovoltaics*. Springer, 2009.
2. Dong J. R., Teng J. H., S. J. Chua, Foo B. C., Y. J. Wang, R. Yin. MOCVD growth of 980 nm InGaAs/GaAs/AlGaAs graded index separate confinement heterostructure quantum well lasers with tertiarybutylarsine. *Journal of Crystal Growth*, 2006, vol. 289, iss. 1, pp. 59-62. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2005.10.138
3. Shastry S. K., Zemon S., Kenneson D. G., Lambert G. Control of residual impurities in very high purity GaAs grown by organometallic vapor phase epitaxy. *Appl. Phys.Lett.*, 1988, vol. 52, iss. 2, p. 150. DOI: 10.1063/1.99034
4. Shunro Fuek, Masasi Umemura, Naoshi Yamada, Kazuhiro Kuwahara, Tetsuji Imai. Morphology of GaAs homoepitaxial layer grown on (111)A substrate planes by organometallic vapor phase deposition. *Journal of Applied Physics*, 1990, vol. 68, iss. 1, pp. 97-100. DOI: 10.1063/1.347076
5. Masashi Umemura, Kazuhiro Kuwahara, Shunro Fuke, Masahiro Sato and Tetsuji Imai. Morphology of AlGaAs layer grown on GaAs(111)A substrate plane by organometallic vapor phase epitaxy. *J. Appl. Phys.*, 1992, vol. 72, iss. 1, p. 313. DOI: 10.1063/1.352141
6. Hanna M. C., Lu Z. H., Majerfeld A. Very high carbon incorporation in metalorganic vapor phase epitaxy of heavily doped p-type GaAs. *Appl. Phys.Lett.*, 1991, vol. 58, iss. 2, p. 164. DOI: 10.1063/1.104960
7. Watanabe N., Ito H. Saturation of hole concentration in carbon-doped GaAs grown by metalorganic chemical vapour deposition. *J. C. Cryst. Growth*, 1997, vol. 182, no 1-2, pp. 30-36. DOI: 10.1016/S0022-0248(97)00333-3
8. Hanna M. C., Lu Z. H., Oh E. G., Mao E., Majerfeld A. Atmospheric pressure organometallic vapor phase epitaxy growth of high-mobility GaAs using trimethylgallium and arsine. *Appl. Phys.Lett.*, 1990, vol. 57, iss. 11, p. 1120. DOI: 10.1063/1.103509
9. Marmalyuk A. A. *Materialy Elektronnoi Tekhniki [Materials of Electronic Technics]*, 2005, no 1, pp. 17-23.
10. Marmalyuk A. A. *Materialy Elektronnoi Tekhniki [Materials of Electronic Technics]*, 2004, no 3, pp 14-18.

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Баранов Валентин Владимирович*, докт. техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск
- Бондаренко Александр Федорович*, канд. техн. наук, доцент, Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск
- Гаверыш Василий Иванович*, докт. техн. наук, доцент, Национальный университет «Львовская политехника»
- Глушеченко Эдуард Николаевич*, канд. техн. наук, начальник отдела, Научно-производственное предприятие «Сатурн», г. Киев
- Кадацкий Анатолий Федорович*, докт. техн. наук, зав. кафедрой, ОНАС им. А. С. Попова, г. Одесса
- Карушкин Николай Федорович*, канд. техн. наук, начальник отдела, НИИ «Орион», г. Киев
- Ковалюк Захарий Дмитриевич*, докт. физ.-мат. наук, руководитель Черновицкого отделения Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ
- Круковский Семен Иванович*, докт. техн. наук, нач. сектора, НПП «Карат», г. Львов
- Кудрик Ярослав Ярославович*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Николаенко Юрий Егорович*, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт»
- Панов Леонид Иванович*, канд. техн. наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет
- Перевертайло Владимир Леонтьевич*, канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ, г. Киев
- Потий Александр Владимирович*, докт. техн. наук, начальник кафедры, Харьковский университет воздушных сил
- Старостенко Владимир Викторович*, докт. физ.-мат. наук, профессор, Таврический НУ им. Вернадского, г. Симферополь
- Стевич Зоран*, докт. техн. наук, профессор, Технический факультет в Боре Белградского университета
- Трофимов Владимир Евгеньевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Хайрнатов Сергей Манисович*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт»
- Цибрий Зиновия Федоровна*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ, г. Киев
- Чечельницкий Виктор Яковлевич*, докт. техн. наук, директор факультета, Одесский национальный политехнический университет
- Щербакова Галина Юрьевна*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

1. К рассмотрению принимаются статьи прикладной направленности на русском или английском языке, которые не были опубликованы ранее и не переданы для публикации в другие издания.

2. В журнале публикуются результаты научно-практических и экспериментальных работ по следующим тематическим направлениям:

- Современные электронные технологии;
- Новые компоненты для электронной аппаратуры;
- Электронные средства: исследования, разработки;
- СВЧ-техника;
- Системы передачи и обработки сигналов;
- Микропроцессорные устройства и системы;
- Энергетическая электроника;
- Полупроводниковая светотехника;
- Биомедицинская электроника;
- Сенсоэлектроника;
- Функциональная микро- и нанoeлектроника;
- Обеспечение тепловых режимов;
- Технологические процессы и оборудование;
- Материалы электроники;
- Метрология. Стандартизация.

3. Все поступающие к рассмотрению материалы проходят двухсторонне-закрытое рецензирование.

4. При обнаружении плагиата или фальсификации результатов статья отклоняется.

5. Редакция не взимает плату за опубликование рукописи и не выплачивает авторский гонорар. Экземпляр журнала с опубликованной статьей высылается авторам по почте.

6. Обязательным условием для принятия статьи к печати является ее соответствие общепринятым нормам построения научной публикации, то есть наличие в ней:

- постановки проблемы в общем виде с указанием ее связи с важными научными или практическими задачами;
- анализа последних достижений и публикаций, в которых рассматривается описанная проблема, с выделением той ее части, решению которой посвящена данная статья;
- цели статьи (постановки задачи);
- основного материала с обсуждением и интерпретацией полученных результатов;
- выводов, а также указания на перспективы проведения исследований в данном направлении.

Кроме этого, при оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- возможность практического применения;
- целесообразность таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;
- строгость терминологии;
- композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

7. Статья должна быть четко структурирована, а поставленная задача, выводы и название – согласованы между собой.

8. При написании статьи следует обратить внимание на следующее:

- название рукописи должно быть конкретным, информативным и, в то же время, по возможности кратким;
- аннотация должна быть достаточно лаконичной (от 30 до 60 слов) и в то же время информативной, соответствовать содержанию статьи и показывать, что сделано в работе;

— ключевые слова должны быть подобраны так, чтобы вероятность нахождения статьи через поисковые системы была как можно выше;

— описание результатов, представленных на рисунках, должно включать в себя интерпретацию этой информации, а не сводиться к дублированию подрисовочных подписей или к простому описанию приведенных зависимостей. Например, вместо таких неинформативных фраз, как «На рис. 1 приведен график зависимости А от В. Из рисунка видно, что при возрастании В значение А монотонно уменьшается.», следует дать пояснение типа «Как видно из рис. 1, при возрастании В значение А монотонно уменьшается, что свидетельствует о том, что ...»;

— выводы (заключение) не должны повторять аннотацию — в них нужно показать, что получено в работе, кратко и четко сформулировать результаты работы, а не приводить краткое содержание статьи. (Правильно сформулировать выводы помогут такие фразы, как «Проведенное исследование показало, что ...», «Разработанная методика позволяет ...», «Авторами установлено, что ...» и др.)

9. Список «Использованные источники» (образец см. на сайте) формируется в порядке их упоминания в тексте. При этом нужно иметь в виду следующее:

— обязательно наличие ссылок на статьи и монографии последних лет, в том числе зарубежных авторов;

— не рекомендуется включать в список литературы ссылки на такие нормативные документы, как указы, акты и т. п. — если без этого нельзя обойтись, лучше упомянуть их непосредственно в тексте статьи;

— желательно избегать ссылок на труднодоступные или недолговечные источники;

— при ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует указывать не только саму книгу, но и страницу (например, [2, с. 418]);

— количество источников не должно быть неоправданно большим: для подтверждения какого-либо факта достаточно одной-двух ссылок.

10. Тематическую информацию (название, ФИО авторов, место работы, аннотацию и ключевые слова) для русскоязычной статьи нужно привести на украинском (по возможности) и английском языках в конце статьи. При этом англоязычная аннотация должна быть представлена в расширенном виде (до 250 слов) и отражать все структурные элементы статьи (актуальность темы, постановку задачи, описание решения, выводы и практическую значимость).

Для статей на английском языке приводится краткая аннотация (50—100 слов), а также перевод тематической информации на русский и украинский (по возможности).

11. Редакция не предъявляет жестких требований к объему статьи — главное, чтобы он был оправдан.

12. При наборе текста статьи допускается использование программ типа MathType только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

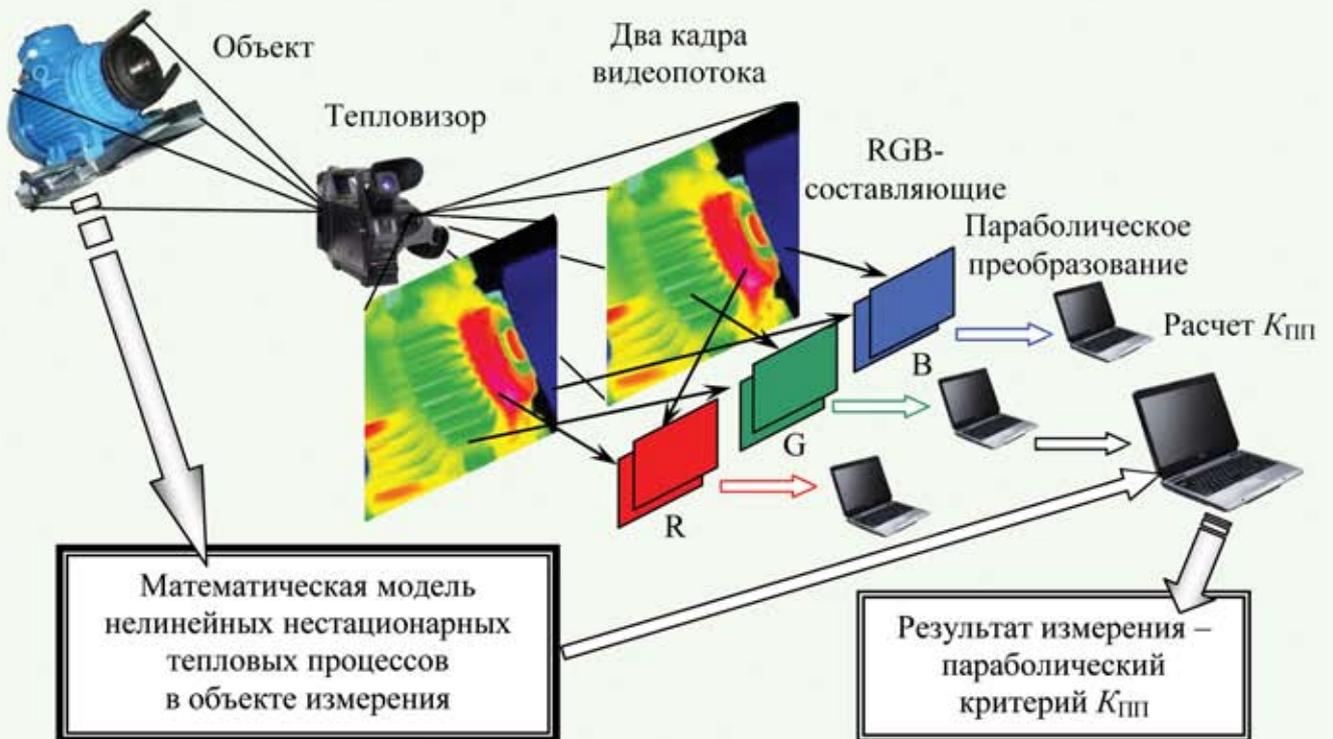
13. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а терминология соответствовать общепринятой. Все использованные символы и аббревиатуры нужно пояснить при первом их упоминании в тексте.

14. В начале статьи необходимо указать ее индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).

15. Материалы статьи, вместе с подписанным Авторским соглашением и информацией об авторах (см. на сайте), направляются по e-mail <tkea@optima.com.ua>.

P.S. Для контроля выполнения требований к содержанию статьи авторы могут воспользоваться критериями, по которым рукопись будет оцениваться рецензентом (см. бланк рецензии на сайте).

К статье «Экспресс-метод оценки изменений температуры элементов РЭА с помощью ИК-видеопотока, испускаемого их поверхностями»



К статье «Формирование резких границ раздела в эпитаксиальных структурах $p^+-AlGaAs/n-GaAs$ МОС-гидридной эпитаксии»





ЭНЕРГИЯ 2014

Специализированная выставка энергетики,
автоматики, электрооборудования
10-12 Сентябрь 2014

Тематические разделы:

- Электроэнергетика
- Тепловая энергетика
- Электротехническое оборудование
- Контрольно-измерительные приборы и автоматика
- Промышленная автоматизация
- Кабельно-проводниковая продукция
- Электронные компоненты и системы
- Промышленное освещение
- Системы жизнеобеспечения промышленных объектов и жилья
- Энергосберегающие технологии
- Инновационные и инвестиционные проекты в энергетике

КОЗАК
ПАЛАЦ

Выставочный центр: Козак Палац
Украина, ул. Победы 70 Запорожье
Телефон: +38 (061) 213 50 26
<http://expo.ua.all.biz/energiya-expo36>
Организатор: Запорожская ТПП

Номер готовили
Алчевск, Бор, Днепропетровск, Донецк,
Киев, Львов, Минск, Одесса, Симферополь,
Харьков, Черновцы



Пишите
Подписывайтесь
Читайте