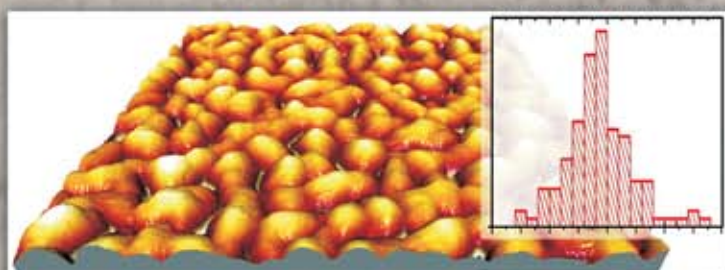
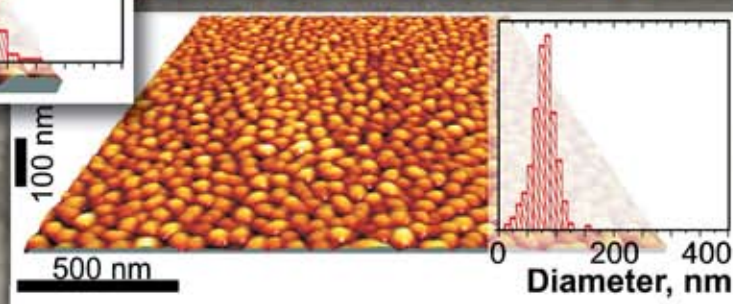
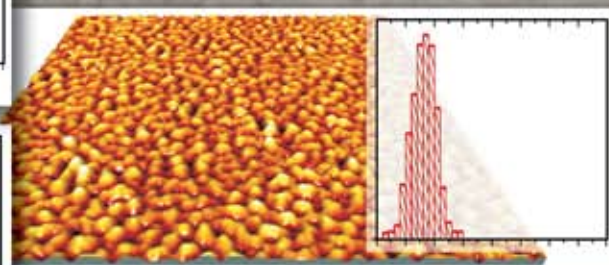
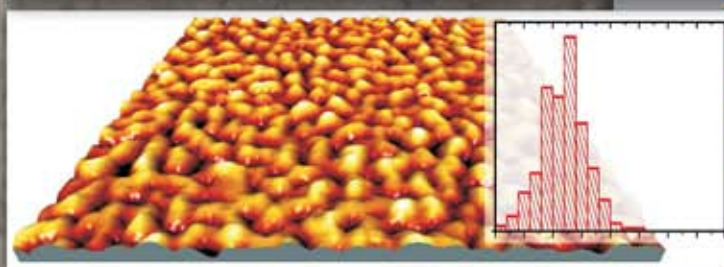
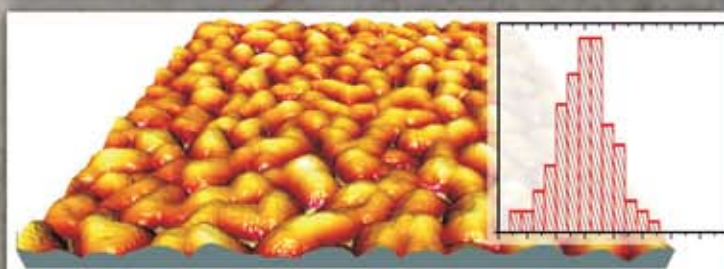


Технология и конструирование в электронной аппаратуре



К статье
«Тонкие нанонеоднородные пленки
Ge на GaAs: получение, свойства
и применение»



4 2014

ИЮЛЬ — АВГУСТ

Издательство «Политехперіодика»



E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua
Login Skype: [politehperiodika](https://www.skype.com/name/username/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.



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

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. Корещук.
Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 29.08.2014. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Печ. л. 8,0+1,0. Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 200 экз. Заказ № 159.
Издательство «Политехперіодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).
Отпечатано в типографии РА «ART-V»
(65026, г. Одесса, ул. Гаванная, 3).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2014

№ 4

Год издания 38-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмилё

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.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. главного 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. главного 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. Томашич (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 «Политехперіодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 1 от 29.08 2014 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

СОДЕРЖАНИЕ

Электронные средства: исследования, разработки

Моделирование технического ресурса радиоэлектронных средств. *Невлюдова В. В.* 3

СВЧ-техника

Поглотители СВЧ-энергии на основе нитрида алюминия с высоким уровнем поглощения. *Часнык В. И.* 8

Системы передачи и обработки сигналов

Кодер и декодер фрактальных сигналов гребенчатой структуры. *Политанский Р. Л., Верига А. Д.* 13

Сенсоэлектроника

Трехпараметрический генераторный датчик. *Филинюк Н. А., Лищинская Л. Б., Лазарев О. О., Ткачук Я. С.* 21

Биомедицинская электроника

Термоэлектрический источник питания для электронного медицинского термометра. *Анатычук Л. И., Кобылянский Р. Р., Константинович И. А.* 28

Энергетическая электроника

Гибридные энергонакопители на основе аккумуляторов и суперконденсаторов для контактной микросварки. *Бондаренко Ю. В., Сафронов П. С., Бондаренко А. Ф., Сидорец В. Н., Рогозина Т. С.* 33

Технологические процессы и оборудование

Получение, свойства и применение тонких нанонеоднородных пленок Ge на GaAs-подложках. *Венгер Е. Ф., Литвин П. М., Матвеева Л. А., Митин В. Ф., Холевчук В. В.* 39

Особенности трансформации примесно-дефектных комплексов в CdTe:Cl под воздействием СВЧ-облучения. *Будзуляк С. И., Корбутяк Д. В., Лоцько А. П., Вахняк Н. Д., Калитчук С. М., Демчина Л. А., Конакова Р. В., Шинкаренко В. В., Мельничук А. В.* 45

Материалы электроники

Ионизационный отжиг полупроводниковых кристаллов. Часть первая: Теоретические предпосылки. *Гаркавенко А. С., Мокрицкий В. А., Банзак О. В., Завадский В. А.* 50

Гибкие фольгированные диэлектрики: классификация и анализ направлений применения и совершенствования. *Воробьев А. В., Жора В. Д.* 56

Список рецензентов номера 62

Памятка автору журнала «ТКЭА» 63

Новые книги 12, 20, 32

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Моделювання технічного ресурсу радіоелектронних засобів. *Невлюдова В. В.* (3)

НВЧ-електроніка

Поглиначі НВЧ-енергії на основі нітриду алюмінію з високим рівнем поглинання. *Часник В. І.* (8)

Системи передачі та обробки сигналів

Кодер і декодер фрактальних сигналів гребінчастої структури. *Політанський Р. Л., Верига А. Д.* (13)

Сенсоелектроніка

Трипараметричний генераторний датчик. *Філінюк М. А., Ліщинська Л. Б., Лазарєв О. О., Ткачук Я. С.* (21)

Біомедична електроніка

Термоелектричне джерело живлення для електронного медичного термометра. *Анатичук Л. І., Кобилянський Р. Р., Константинович І. А.* (28)

Енергетична електроніка

Гібридні енергонакопичувачі на основі акумуляторів та суперконденсаторів для контактної мікрозварювання. *Бондаренко Ю. В., Сафонов П. С., Бондаренко О. Ф., Сидорець В. М., Рогозіна Т. С.* (33)

Технологічні процеси та обладнання

Отримання, властивості та застосування тонких нанонеоднорідних плівок Ge на GaAs-підкладках. *Венгер Є. Ф., Литвин П. М., Матвеева Л. О., Мітін В. Ф., Холєвчук В. В.* (39)

Особливості трансформації домішково-дефектного комплексу в CdTe:Cl під дією НВЧ-опромінення. *Будзюляк С. І., Корбутяк Д. В., Лоцько А. П., Вахняк Н. Д., Калитчук С. М., Демчина Л. А., Конакова Р. В., Шинкаренко В. В., Мельничук А. В.* (45)

Матеріали електроніки

Іонізаційний відпал напівпровідникових кристалів. Частина перша: Теоретичні передумови. *Гаркавенко О. С., Мокрицький В. А., Банзак О. В., Завадський В. О.* (50)

Гнучкі фольговані діелектрики: класифікація і аналіз напрямів застосування та вдосконалення. *Воробйов А. В., Жора В. Д.* (56)

CONTENTS

Electronic means: investigations, development

Modeling of useful operating life of radioelectronics. *Nevlyudova V. V.* (3)

Microwave engineering

Microwave energy attenuators on the basis of aluminum nitride with high level of microwave energy absorption. *Chasnyk V. I.* (8)

Signals transfer and processing systems

Coder and decoder of fractal signals of comb-type structure. *Politanskyi R. L., Veryga A. D.* (13)

Sensors

Generating three-parameter sensor. *Filinyuk M. A., Lishchinska L. B., Lazarev O. O., Tkachuk Y. S.* (21)

Biomedical electronics

Thermoelectric power source for electronic medical thermometer. *Anatychuk L. I., Kobylanskyi R. R., Konstantinovich I. A.* (28)

Power electronics

The hybrid energy storages based on batteries and ultracapacitors for contact microwelding. *Bondarenko Yu. V., Safronov P. S., Bondarenko O. F., Sydorets V. M., Rogozina T. S.* (33)

Production technology and equipment

Fabrication, properties and application of Ge-on-GaAs thin nanoheterogeneous films. *Venger E. F., Lytvyn P. M., Matveeva L. A., Mitin V. F., Kholevchuk V. V.* (39)

Features of transformation of impurity-defect complexes in CdTe:Cl under the influence of microwave radiation. *Budzulyak S. I., Korbutyak D. V., Lots'ko A. P., Vakhnyak N. D., Kalitchuk S. M., Demchina L. A., Konakova R. V., Shinkarenko V. V., Mel'nychuk A. V.* (45)

Materials of electronics

Ionization annealing of semiconductor crystals. Part one: Theoretical background. *Garkavenko A. S., Mokritskii V. A., Banzak O. V., Zavadskii V. A.* (50)

Flexible foiled dielectrics: classification and analysis of ways for application and improvement. *Vorobyev A. V., Zhora V. D.* (56)

В. В. НЕВЛЮДОВА

Украина, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

E-mail: tapr@khture.kharkov.ua

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Рассматривается возможность использования законов неравновесной термодинамики для определения связи между контролируемыми параметрами радиоэлектронных средств (РЭС) и окружающей среды, а также построение детерминированной термодинамической модели процессов развития производственных дефектов. Предложена модель процесса расходования ресурса РЭС, основанная на термодинамическом подходе при описании деградиционных процессов, которые ограничивают время работы аппаратуры.

Ключевые слова: термодинамическая модель, процесс расходования ресурса, деградиционные процессы.

Технический ресурс радиоэлектронных средств (**РЭС**) — один из важнейших показателей долговечности, характеризующий наработку объекта от начала или возобновления эксплуатации до наступления предельного состояния, под которым понимают полную или частичную потерю изделием работоспособности вследствие ухода одного или нескольких параметров за пределы установленных норм. Исходя из этого, прогнозирование расходования технического ресурса является важной технической задачей и дает возможность повысить надежность работы РЭС.

В настоящее время для прогнозирования расходования технического ресурса РЭС предлагаются методы, основанные на интерполяции случайных реализаций временных функций, получаемых в процессе наблюдения за параметрами в начальной и последующих стадиях жизненного цикла РЭС [1]. Однако достоверность такого прогноза незначительна и не отвечает требованиям при решении практических задач обеспечения надежности РЭС.

Другие методы прогнозирования основаны на принципах распознавания, где может быть задействован человек, который наблюдает за процессом и оценивает состояние РЭС на основе этих наблюдений и анализа ситуации — лицо, принимающее решение (**ЛПР**). Этот подход принят в качестве основного для прогнозирования процессов, происходящих в сложных системах [2, 3]. Поведение ЛПР и его решения должны подчиняться представлениям о некоторой детерминированной модели процесса. Существует связь между детерминированностью и получением достоверного прогноза. Детерминированность в этом случае предполагает использование адекватной кинетической модели развития дефектов и отображение информации, которая должна со-

ответствовать модели процесса, т. е. отражать изменение состояния объекта [4, 5].

В настоящей работе исследуется возможность прогнозирования технического состояния РЭС на основе модели процесса расходования их ресурса, основанной на термодинамическом подходе к описанию деградиционных процессов, порождающих случайную составляющую во временной зависимости изменения параметров РЭС. Эта составляющая и определяет точность прогнозирования.

Модель технического ресурса затрагивает существование РЭС во времени и предполагает отображение процессов формирования качества при создании РЭС и изменение его при эксплуатации. Моделирование этих процессов позволяет выявить необходимые показатели, предложить методы их наблюдения и прогнозирования.

Существование РЭС можно рассматривать как становление ресурса в процессе создания средства и расходование ресурса в процессе его эксплуатации. Кинетику расходования ресурса можно охарактеризовать функционалом от показателей надежности, в частности [6]

$$Z(t, T) = -\ln P(t, T) = \int_0^t \lambda(t, T) dt, \quad (1)$$

где t — время;

T — характеристика взаимодействия объектов со средой (нагрузки) или характеристика внутренних факторов (в т. ч. дефектов);

Z — мера расхода ресурса;

P — вероятность безотказной работы;

λ — интенсивность отказов как скорость расходования ресурса в статистическом смысле.

В реальной среде для конкретных типов материалов, узлов и изделий радиоэлектронное средство можно рассматривать как твердое тело, в котором имеется некоторое количество неравновесных состояний (дислокаций, дефектов, неравновесных фаз, градиентов концентрации примесей и т. п.). Наличие неравновесных состояний ведет к развитию процессов переноса вещества и к химическим реакциям, имеющим место в объеме тела и наиболее активно протекающим на его поверхности. Если прибор (элемент) находится под электрической нагрузкой, то наведенные тепловые и электрические поля оказывают влияние на развитие процессов переноса и на скорость химических реакций. Наведенные поля вызывают так называемые эффекты наложения, такие как эффект Пельтье, эффект, вызывающий поток тепла из-за градиента концентраций, электродиффузия и др. [7].

Эти явления и взаимодействие с окружающей средой ведут к необратимому изменению физико-химических свойств материалов. Следствием этих изменений является изменение электрических параметров РЭС. При достижении одним или несколькими параметрами критических значений наступает параметрический отказ.

Характерной особенностью физических процессов является их направленность во времени в соответствии со вторым началом термодинамики, которое устанавливает поведение функции состояния системы, называемой энтропией S , и в соответствии с которым для изолированных систем справедлива запись $dS \geq 0$.

Процесс появления неоднородности структуры РЭС можно трактовать как нарушение равновесного состояния термодинамической системы, что приводит к изменению энтропии. Следовательно, с физической точки зрения процесс расходования ресурса и жизненный цикл РЭС можно рассматривать как процесс необратимого изменения (эволюции или деградации) термодинамического состояния объекта, т. е. как процесс производства энтропии dS/dt . Эта величина характеризует многообразные необратимые физико-химические процессы при влиянии внешних и внутренних факторов T и выступает, таким образом, в качестве интегральной скорости расходования ресурса, которая может иметь такой же характер временной зависимости, как и $\lambda(t, T)$.

На рисунке, где представлены возможные реализации dS/dt , линия T_1 соответствует экспоненциальному распределению вероятности безотказной работы, T_2 — закону распределения Вейбулла [8].

При описании процессов расходования ресурса представляется целесообразным использование термодинамического подхода, где в форме второго начала термодинамики постулируется характерная для рассматриваемых реакций необратимость энтропии как функция состояния системы, несимметричная относительно времени.

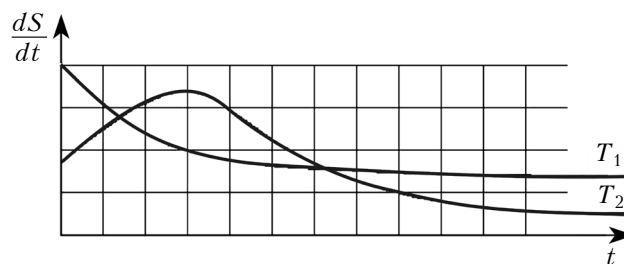


График изменения ресурса РЭС

Термодинамический подход, основанный на необратимости физических процессов, объединяет в себе уравнения баланса, классическую термодинамическую теорию устойчивости, флуктуационную и эволюционную теории. Такое обобщение имеет существенное методологическое значение с точки зрения единства макроскопического процессуального описания сложных объектов различной физической природы.

Физическую основу эволюционных процессов составляют неравновесные состояния системы и соответствующие им необратимые процессы. Согласно второму началу термодинамики эволюция термодинамических систем происходит в направлении перехода системы из неравновесного состояния — $\delta(S) > 0$ в стационарное — $\delta(S) = \min$ и далее в состояние полного термодинамического равновесия — $\delta(S) = 0$. Эти соотношения можно рассматривать как критерии характера эволюции, представленные в общем виде. Подобный характер эволюционных процессов предполагает существование двух масштабов времени релаксации системы: время релаксации неравновесного состояния и время релаксации стационарного состояния. Эти масштабы существенно различаются, что является основанием для введения временной иерархии и, соответственно, понятия временной организации физических систем в общем и РЭС в частности.

Конечность значения производной энтропии по времени дает основание предположить, что процессы эволюции термодинамических систем носят монотонный релаксационный характер. Этот вывод совпадает с выводами, следующими из статистической теории. Уравнения Онзагера [9] при определенных допущениях, в частности при условии стабилизации термодинамических сил, могут быть представлены как линейные дифференциальные уравнения во временной области относительно экстенсивных параметров y_j с постоянными коэффициентами L_{jk} , решения которых записываются в виде

$$y_j(t) - y_j(0) = \sum_k [L_{jk} \exp(-t/\tau_k)], \quad (2)$$

где $y_j(0)$ — неравновесные или стационарные значения соответствующих параметров системы в зависимости от рассматриваемого масштаба эволюции;

τ_k — время релаксации соответствующих необратимых процессов в системе.

Примерами подобной формы эволюционных или релаксационных процессов являются решения во временной области феноменологических уравнений диффузии, теплопроводности, линейных химических реакций. В виде суперпозиции экспоненциальных функций можно представить интегральный процесс эволюции (релаксации) системы по производству энтропии $d_i S/dt$. Применительно к РЭС эволюционные процессы можно интерпретировать как энтропийные интегральные процессы приближения к отказовым ситуациям, потери работоспособности или расходования ресурса. Этим обусловлена их значимость в задачах интегральной диагностики РЭС. Термин «эволюционные процессы» можно использовать в качестве обобщения понятия «деградационные процессы», учитывая закономерный, направленный характер необратимых процессов изменения термодинамического состояния РЭС.

В неравновесной термодинамике тождественно справедливы критерии эволюции. При этом подразумевается, что соотношения между потоками и силами справедливы вблизи как равновесных, так и стационарных состояний. Нелинейные соотношения между потоками и силами могут проявляться вдали от равновесных или стационарных состояний. В нелинейной области эволюция системы может иметь существенно более сложный характер — могут возникать новые состояния и новые типы организации. Типичными примерами подобных процессов являются фазовые переходы. Для учета подобных эффектов представляется возможным использование теории флуктуаций, которая является связующим звеном между теорией термодинамического равновесия и теорией необратимых процессов.

Соответствие критериям эволюции свидетельствует о термодинамической устойчивости, когда флуктуации являются быстро затухающими и влияют только на характеристики шумов РЭС, но не на общие закономерности эволюции состояния системы. Положение существенно меняется, когда возникает неустойчивость вдали от равновесных или стационарных состояний при нелинейных соотношениях, например в области фазовых переходов. Тогда флуктуации возрастают и в итоге определяют новое устойчивое макроскопическое состояние системы. Таким образом, новые макроскопические состояния и структуры в смысле временной и пространственной организации могут быть результатом неустойчивости системы и возникают из флуктуации. Такая «самоорганизация» имеет непосредственное отношение к локальным отказовым процессам в РЭС, например к электрическому пробоя изолирующих слоев больших интегральных схем.

В соответствии с макроскопическим подходом затухание флуктуаций для устойчивых состояний термодинамических систем подчиняется релаксационным законам необратимых про-

цессов. При этом макроскопические неравновесные состояния и соответствующие им необратимые процессы интерпретируются как крупномасштабные флуктуации.

Масштабы флуктуационных процессов определяются микроскопичностью объектов и применимости феноменологических параметров и соотношений неравновесной термодинамики. Для объектов РЭС условия возникновения мелкомасштабных флуктуаций должны однозначно выполняться, поскольку функциональные процессы в РЭС являются процессами микроскопического порядка. Тенденции развития РЭС определяются стремлением к предельным характеристикам по степени интеграции, быстродействию, потребляемой мощности, информационной, функциональной и физической сложности. В этих условиях мелкомасштабные флуктуации приобретают практический смысл принципиальных физических ограничений в процессах измерения, хранения, передачи и обработки информации в РЭС, учитываются при проектировании и не привлекаются к анализу отказовых ситуаций РЭС, вызванных производственными дефектами. По мере увеличения физической сложности РЭС за счет возрастания степени неравновесности структуры объектов увеличение влияния деградационных процессов существенно опережает увеличение влияния флуктуационных процессов [10, 11].

С термодинамической точки зрения процесс измерения имеет ряд особенностей. Во-первых, существует непосредственная взаимосвязь между энтропийными и информационными характеристиками процессов измерения, передачи и обработки информации. Пределы точности измерений определяются рассмотренными выше ограничениями — крупномасштабными термодинамическими (kT) и мелкомасштабными квантовыми ($h/\Delta t$). Во-вторых, необратимый характер процессов измерения как процессов взаимодействия измерительного прибора и объекта обуславливает определенную взаимосвязь (предельные соотношения) между термодинамическими характеристиками (энергия, энтропия) и информационными (точность, количество информации).

Для флуктуаций, вызванных наблюдениями, существует понятие характерного интервала или минимального масштаба времени, которое определяет масштаб флуктуации:

$$\tau = \frac{\Delta y}{\partial y / \partial t}, \quad (3)$$

где y — макроскопический параметр системы;

Δy — минимальное регистрируемое изменение y .

Из этого выражения видно, что масштаб флуктуаций может изменяться в больших пределах, и измерение является частью отображаемых эволюционных и флуктуационных процессов.

Для крупномасштабных эволюционных процессов время релаксации составляет: для тепловых процессов $10^{-1} - 10^{-3}$ с; для процессов изменения физической структуры $10^1 - 10^3$ ч; для процессов расходования ресурса $10^4 - 10^6$ ч.

Таким образом, при отображении процессов развития производственных дефектов должен учитываться эволюционный и флуктуационный характер процессов. Релаксационный характер крупномасштабных процессов обусловлен свойствами неравновесных состояний физических систем. Существенную роль играет то, что экспоненциальная форма решений уравнения (2) не зависит от конкретного вида исходных уравнений Онзагера. Это означает инвариантность (в определенных пределах) типа и содержания РЭС, условий его взаимодействия со средой, вида и масштаба рассматриваемых процессов. Судя по времени релаксации, можно сделать вывод, что наблюдаемые эволюционные процессы в производстве и техническом обслуживании РЭС и соответствующие им модели имеют отношение к расходованию ресурса и изменению физической структуры РЭС.

Термодинамический и образный подход не противоречат часто используемой на практике статистической теории эволюционных процессов. Здесь временная зависимость параметров среды, в которой происходят эти процессы, имеет детерминированную и случайную составляющие, что дает возможность универсальным образом описать изменение параметров РЭС с использованием вероятностных оценок их поведения.

В рамках термодинамического подхода становится возможным использование известных моделей эволюционных процессов, происходящих в среде, в которой имеется некоторое количество неравновесных состояний — дислокаций, градиентов концентраций и т. д. В первую очередь, здесь можно увидеть наличие двух неравновесных фаз, которые имеют границу, изменяющуюся со временем. Наличие неравновесных состояний ведет к развитию процессов переноса вещества (диффузия, электромиграция и др.) и к химическим реакциям, протекающим в объеме и на поверхности материальной среды РЭС. Очевидно, можно использовать представление о среде существования РЭС как об объекте, в котором находятся изменяющиеся с течением времени части непрореагировавшего и прореагировавшего вещества, при этом изменения происходят в соответствии с закономерностями протекания реальных реакций [12]. Часть непрореагировавшего вещества может служить мерой ресурса РЭС.

При отображении предлагаемой модели представляется результативным использование концепции, которая предусматривает отображение информации в виде области признакового пространства. При этом наблюдается изменение области контролируемых параметров, имеющее

прямой смысл для оценки технического состояния РЭС, появляется возможность отображения информации о расходовании ресурса и прогнозирования отказов РЭС. Изображаемая предельная область является подобием «тела» в реальной физической среде, в котором происходят реальные физические процессы. Область, соответствующая реальным параметрам, имеет отличные от окружающей среды свойства. Тогда процесс изменения наблюдаемого изображения дает представление о расходовании ресурса РЭС. Очевидно, сопоставляя динамику изменения ресурса и объема прореагировавшего вещества, который в условиях нормировки области граничных значений параметров приближается к единице, можно увидеть аналогию между ресурсом и объемом, т. е. в поле зрения попадает изображение ресурса.

Выводы

Таким образом, исследования подтвердили возможность использования термодинамического подхода при описании деградационных процессов, что основано на аналогии в поведении энтропии, термодинамических параметров среды и реальных параметров РЭС.

Предложенная детерминированная термодинамическая модель процессов расходования технического ресурса РЭС учитывает ошибки, вызванные нестабильностью внешних воздействий, и погрешности измерений и дает возможность наблюдать и учитывать изменение технического ресурса при проектировании РЭС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. — Москва: Радио и связь, 1991.
2. Стрельников В. П., Федухин А. В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов систем. — Киев: Логос, 2002.
3. Андрусевиц А. А., Невлюдов И. Ш., Роздоловский Ю. М., Второв Е. П., Сотник С. В. Оценивание свойств материалов, образующих монтажные соединения электронной техники // Технология приборостроения. — 2005. — № 2. — С. 51—59.
4. Андрусевиц А. А., Невлюдов И. Ш., Омаров М. А., Второв Е. П. Методы термодинамики при моделировании процесса расходования ресурса электронной аппаратуры // Технология приборостроения. — 2007. — № 2. — С. 10—12.
5. Андрусевиц А. А., Невлюдов И. Ш. Алгоритм работы системы мониторинга расходования ресурса радиоэлектронных средств // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. — 2012. — № 1. — С. 7—10.
6. Чаплыгин Д. Ю., Абрамов П. Б., Цветков В. В. Имитационная модель динамики отказов и восстановления работоспособности сложных радиоэлектронных систем // В сбор. науч. трудов: Математическое моделирование систем обработки информации и управления. — Воронеж: ин-т МВД России. — 2001. — С. 14—19.
7. Черняев В. Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. — Москва: Высш. шк., 1987.
8. Невлюдов И. Ш., Роздоловский Ю. М., Андрусевиц А. А. Гетерогенные модели развития производственных дефектов // Авиационно-космическая техника и технология. — Харьков: ХАИ. — 2003. — № 38. — С. 114—119.
9. Невлюдов И. Ш., Второв Е. П., Роздоловский Ю. М. Кинетические модели развития дефектов, возникающих в производстве электронной техники // Авиационно-

космическая техника и технология. — Харьков: ХАИ. — 2003. — № 39. — С. 76–81.

10. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. — Москва: Высш. шк., 1970.

11. Огарков М. А. Методы статистического оценивания параметров случайных процессов. — Москва: Энергоатомиздат, 1990.

12. Невлюдов И. Ш., Роздоловский Ю. М. Отображение процессов проявления технологической наследственности электронной техники // Науч.-техн. сб. «Радиотехника». — Харьков: ХНУРЕ. — 2003. — № 133. — С. 218–221.

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.04 2014 г.

В. В. НЕВЛЮДОВА

Україна, Харківський національний університет радіоелектроніки
E-mail: tapr@khture.kharkov.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО РЕСУРСУ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Розглядається можливість використання законів нерівноважної термодинаміки для визначення зв'язку між контрольованими параметрами РЕЗ та відображуваного середовища, а також побудова детермінованої термодинамічної моделі процесів розвитку виробничих дефектів. Запропоновано модель процесу витрачання ресурсу радіоелектронних засобів, засновану на термодинамічному підході при опису деградаційних процесів, які обмежують час роботи апаратури.

Ключові слова: термодинамічна модель, процес витрачання ресурсу, деградаційні процеси.

DOI: 10.15222/TKEA2014.4.03
UDC 621.7.073-52

V. V. NEVLYUDOVA

Ukraine, Kharkov national university of radio electronics
E-mail: tapr@khture.kharkov.ua

MODELING OF USEFUL OPERATING LIFE OF RADIOELECTRONICS

The author considers the possibility of using the laws of nonequilibrium thermodynamics to determine the relationship between controlled parameters of radioelectronics and the displayed environment, as well as the construction of a deterministic model of the processes of manufacturing defects development. This possibility is based on the observed patterns of change in the amount of content area, in accordance with the principles of behavior of the thermodynamic parameters characterizing the state of the real environment (entropy, the quantity of heat, etc.). The equation for the evolution of the technical state of radioelectronics is based on the deterministic kinetic model of the processes occurring in the multi-component environment, and on the observation model, which takes into account the errors caused by external influences instability and uncertainty.

Keywords: thermodynamic model, the process of spending resource, degradation processes.

REFERENCES

1. Davydov P.S. *Tekhnicheskaya diagnostika radioelektronnykh ustroystv i sistem*. [Technical diagnostics of electronic devices and systems]. Moscow, Radio and communication, 1991, 256 p. (in Russian)
2. Strel'nikov V.P., Fedukhin A.V. *Otsenka i prognozirovaniye nadezhnosti elektronnykh elementov sistem* [Evaluation and prediction of reliability of electronic systems elements]. Kiev, Logos, 2002, 486 p. (in Russian)
3. Andrushevich A. A., Nevlyudov I. Sh., Rozdolovskii Yu. M., Vtorov E. P., Sotneyk S. V. [Estimating properties of the materials forming wirings of electronic equipment]. *Tekhnologiya priborostroeniya*. 2005, no 2, pp. 51–59. (in Russian)
4. Andrushevich A. A., Nevlyudov I. Sh., Omarov M. A., Vtorov E. P. [Thermodynamics methods in modeling the process of spending life electronic equipment]. *Tekhnologiya priborostroeniya*. 2007, no 2, pp. 10–12. (in Russian)
5. Andrushevich A. A., Nevlyudov I. Sh. [How the system will monitor the resource consumption of electronic equipment]. *Radioelektronni i komp'yuterni sistemi*. 2012, no 1, pp. 7–10. (in Russian)
6. Chaplygin D. Yu., Abramov P. B., Tsvetkov V. V. [Simulation model of the dynamics of failure and disaster recovery of complex electronic systems]. *Matematicheskoe modelirovaniye sistem obrabotki informatsii i upravleniya: Sbornik nauchnykh trudov*. Voronezh. in-t MVD Rossii. 2001, pp. 14–19. (in Russian)

7. Chernyaev V.N. *Fiziko-khimicheskie protsessy v tekhnologii REA* [Physico-chemical processes in the technology of electronic equipment]. Moscow, Higher School, 1987, 376 p. (in Russian)
8. Nevlyudov I.Sh., Rozdolovskii Yu.M., Andrushevich A.A. [Heterogeneous model of development production of defects]. *Nauch.-tekhn. zhurnal. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. Khar'kov: «KHAI». 2003, no 38, pp. 114–119. (in Russian)
9. Nevlyudov I.Sh., Vtorov E.P., Rozdolovskii Yu.M. [Kinetic models of development defects arising in the manufacture of electronic equipment]. *Nauch.-tekhn. zhurnal. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. Khar'kov: «KHAI». 2003, no 39, pp. 76–81. (in Russian)
10. Sotnikov B.S. *Osnovy teorii i rascheta nadezhnosti elementov i ustroystv avtomatiki i vychislitel'noi tekhniki*. [Fundamentals of the theory and calculation of reliability of the components and devices of automation and computing]. Moscow, Visschaya shkola, 1970, 270 p. (in Russian)
11. Ogarkov M.A. *Metody statisticheskogo otsenivaniya parametrov sluchainykh protsessov* [Statistical methods for estimating the parameters of stochastic processes]. Moscow, Energoatomizdat, 1990, 208 p. (in Russian)
12. Nevlyudov I. Sh., Rosdolovsky Y. M. [Mapping processes of manifestations technological heredity electronic equipment]. *Nauch.-tekhn. sb. «Radiotekhnika»*. Khar'kov, KHNURE, 2003, no 133, pp. 218–221. (in Russian)

К. т. н. В. И. ЧАСНЫК

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

ПОГЛОТИТЕЛИ СВЧ-ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ПОГЛОЩЕНИЯ

Экспериментально исследованы материалы на основе нитрида алюминия с добавками молибдена или карбида кремния с высокими уровнями поглощения СВЧ-энергии. Приведены значения диэлектрических характеристик, теплопроводности, объемного удельного электрического сопротивления и коэффициентов поглощения электромагнитной энергии в этих композитах. Установлена взаимосвязь между уровнем поглощения и удельным электрическим сопротивлением материала поглотителя, а также диэлектрической проницаемостью, тангенсом угла диэлектрических потерь и концентрацией поглощающей фазы.

Ключевые слова: объемный поглотитель, коэффициент поглощения электромагнитной энергии, объемное удельное электрическое сопротивление, композит, нитрид алюминия.

Большинство композитных материалов, поглощающих СВЧ-энергию, имеют коэффициент поглощения электромагнитной энергии на уровне 2,5–4,0 дБ/мм, и только в материале КТ-30 он значительно выше и составляет 5,3–7,5 дБ/мм. Однако коэффициент теплопроводности КТ-30 $\lambda = 5–8$ Вт/(м·К), что совершенно недостаточно для применения его в качестве поглотителя в электронных приборах большой мощности. Такая низкая теплопроводность этого материала обусловлена тем, что поглощающей фазой в нем является полупроводниковое соединение Ti_3O_5 , которое образуется при восстановлении TiO_2 в процессе спекания материала в водороде [1]. Свойства полупроводникового Ti_3O_5 сказываются на общем сопротивлении материала КТ-30, которое равно $5 \cdot 10^2$ Ом·м [2]. При этом следует отметить, что у большинства поглощающих материалов объемное удельное электрическое сопротивление ρ составляет $10^{12}–10^{13}$ Ом·м.

Известен материал марки АН-45Ж, обладающий высоким уровнем поглощения (5,0 дБ/мм) и хорошей теплопроводностью (50 Вт/(м·К)), в котором поглощающей фазой являются частицы железа размером 4–8 мкм. Объемное удельное электрическое сопротивление этого материала равно 10^3 Ом·м [3]. Но, к сожалению, АН-45Ж нельзя использовать в качестве поглотителя для электронных приборов, поскольку из-за наличия в его составе частиц железа он проявляет магнитные свойства, что может вредить фокусировке электронного потока в приборе СВЧ. Материал применяется в качестве согласован-

ных коаксиальных оконечных нагрузок в измерительной аппаратуре.

Похожие свойства по затуханию проявляются и в поглотителях СВЧ-энергии в виде тонких пленок поглощающего материала, которые наносят на опорные керамические стержни, закрепляющие спираль в лампе бегущей волны. Анализ опубликованных данных о величине вносимого погонного затухания для двух спиральных замедляющих систем с разными размерами, приведенных в [4], показывает, что максимальное погонное затухание тоже связано с уменьшением поверхностного сопротивления поглощающего покрытия.

Из проведенного анализа свойств поглотителей можно предположить, что их способность к поглощению больших уровней СВЧ-энергии наряду с пониженным сопротивлением ($\rho = (0,5–1,0) \cdot 10^3$ Ом·м) не является простой случайностью, тем более что и пленочные поглотители проявляют аналогичные свойства.

Целью данной работы была проверка этого предположения, для чего были проведены экспериментальные исследования материалов на основе нитрида алюминия с добавками молибдена или карбида кремния, полученных в таких условиях, при которых они имеют большой уровень поглощения.

Параметры известных и вновь разработанных материалов — поглотителей СВЧ-энергии приведены в **таблице**, а также на **рис. 1 и 2**.

Композиты, занимающие в таблице номера от 1 до 10, были получены при свободном спе-

Параметры материалов-поглотителей СВЧ-энергии

№	Марка материала (химический состав)	Материал поглощающей фазы	a^* , мкм	Количество материала поглощающей фазы, %		Коэффициент поглощения на частоте 9,5–10,5 ГГц		λ , Вт/(м·К)	ε на частоте 3,35 ГГц	$\text{tg}\sigma$ на частоте 3,35 ГГц	ρ , Ом·м	Литературный источник
				по массе	по объёму	дБ/мм	раз/мм					
1	АН–38М (AlN, Mo)	Mo	1–20	38	16,6	3,1–3,5	2,05–2,2	74–78	22–25	0,006–0,008	10^{12}	[5, 6]
2	АНМ–КК (AlN, SiC, Mo)	SiC	3	42	44,5	4,2–4,8	2,6–3,0	47–51	20–21	0,044–0,048	$2 \cdot 10^8$	[8]
		Mo	2,2	8	2,6							
3	АНМ–КК (AlN, SiC, Mo)	SiC	3	48	48,7	3,4–4,0	2,2–2,5	51–56	26–27	0,095–0,105	10^{12}	[8]
		Mo	2,2	2	0,6							
4	АНМ–КК (AlN, SiC, Mo)	SiC	3	46	47,3	3,9–4,5	2,45–2,8	62–68	25–27	0,075–0,085	$3 \cdot 10^8$	[8]
		Mo	2,2	4	1,3							
5	АН–50КК (AlN, SiC)	SiC	5	50	50,5	3,5–3,9	2,2–2,45	38–42	19–21	0,11–0,12	10^{12}	
6	АН–50КК (AlN, SiC)	SiC	3			4,8–5,2	3,0–3,4	33–37	30–32	0,14–0,16	$1 \cdot 10^8$	[6]
7	АН–50КК (AlN, SiC)	SiC	1			6,5–7,1	4,5–5,1	–	36–40	0,21–0,23	$5 \cdot 10^5$	
8	АН–40М (AlN, Mo)	Mo	1–20	40	18,0	3,3–3,7	2,1–2,3	72–78	30–34	0,008–0,009	10^{12}	
9	АН–40М (AlN, Mo)	Mo				4,3–4,7	2,7–2,9	67–73	41–45	0,009–0,011	$5 \cdot 10^9$	
10	АН–40М (AlN, Mo)	Mo				5,4–5,8	3,5–3,8	–	50–54	0,06–0,08	$4 \cdot 10^5$	[7]
11	АН–50М (AlN, Mo)	Mo	4–8	50	24,0	3,0	2,0	70	48 (10 ГГц)	0,005 (10 ГГц)	10^{12}	[3]
12	АН–45Ж (AlN, Fe)	Fe		45	25	5,0	3,1	50	35 (10 ГГц)	0,25 (10 ГГц)	10^3	[3]
13	КТ–30 (Al ₂ O ₃ , TiO ₂)	TiO ₂	–	30	–	5,3–8,0	3,4–6,4	5–8	25–40 (10 ГГц)	0,2–1,0 (10 ГГц)	$5 \cdot 10^2$	[1, 2]

* Размер частиц поглощающей фазы в исходном порошке

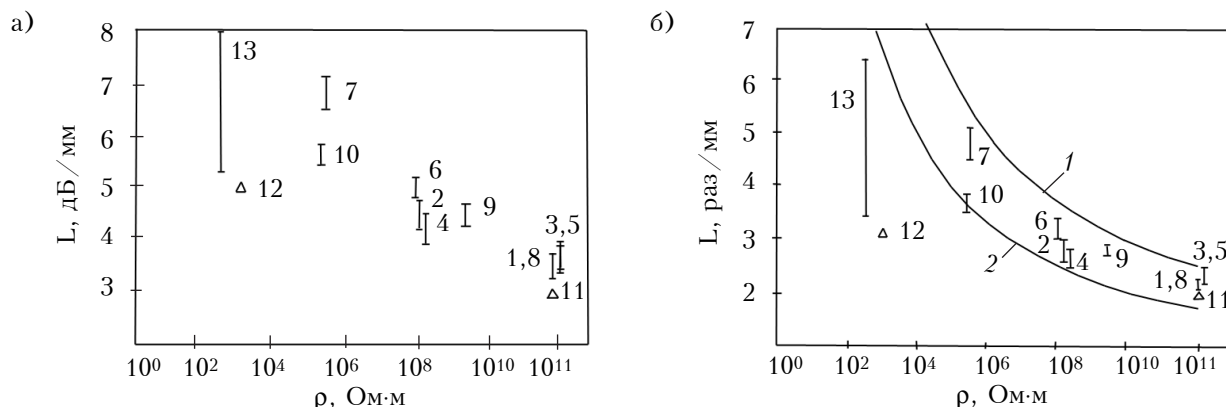


Рис. 1. Значения коэффициента поглощения L (а — в дБ/мм, б — в раз/мм) и соответствующее ему объемное удельное электрическое сопротивление для материалов, приведенных в таблице (цифры соответствуют порядковому номеру материала)

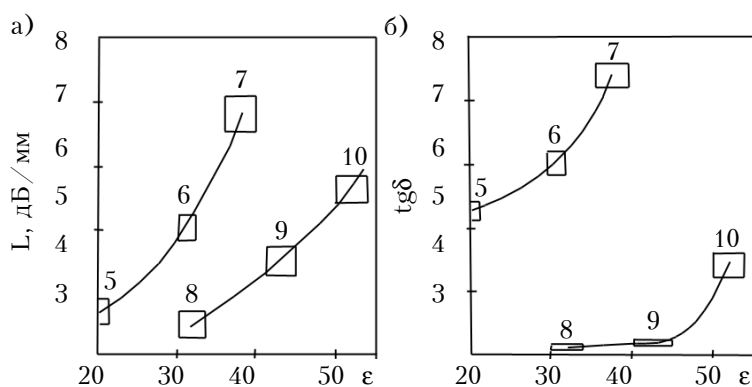


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения (а) и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ (б) от диэлектрической проницаемости ϵ в AlN—SiC (№ 5, 6, 7) и AlN—Mo (№ 8, 9, 10)

кании в среде азота и нормальном атмосферном давлении. В качестве активирующей добавки при спекании всех композитов применяли оксид иттрия в количестве 4% по массе. Для этих композитов в таблице указаны минимальные значения измеренного объемного удельного электрического сопротивления. Материалы с $\rho = 10^{12}$ Ом·м (№ 1, 3, 5, 8, 11) спекались при температуре 1800–1850°C, время выдержки 60 мин. Композиты с $\rho = (4-5) \cdot 10^5$ Ом·м (№ 7, 10) спекались при температуре 1900–1950°C, время выдержки 120 мин. Для композитов № 2, 3, 4 в [8] приведены данные для поглощения и коэффициента теплопроводности, а для композита № 10 в [7] приведен только коэффициент поглощения.

Рассмотрим взаимосвязь поглощения и объемного удельного сопротивления в исследуемых материалах, используя приведенные в таблице данные.

Из рис. 1, а видно, что существуют три группы материалов — поглотителей СВЧ-энергии, значительно отличающихся как по уровню поглощения, так и по величине объемного удельного электрического сопротивления. Материалы

одной группы (№ 1, 3, 5, 8, 11) имеют удельное сопротивление 10^{12} Ом·м (что соответствует сопротивлению керамических изоляторов) и коэффициент поглощения от 3,0 до 4,0 дБ/мм, материалы второй (№ 7, 10) — сопротивление $(4-5) \cdot 10^5$ Ом·м и высокий уровень поглощения 5,4–7,1 дБ/мм. Сопротивление и уровень поглощения материалов третьей группы (№ 2, 4, 6, 9) занимают промежуточные значения.

Анализ рис. 1 показал, что если коэффициент поглощения СВЧ-энергии выразить в раз/мм, то проявляется определенная связь между уровнем поглощения и величиной

электрического сопротивления. Как видно из рис. 1, б, уровни поглощения рассмотренных материалов-поглотителей находятся между кривыми 1 и 2, которые описываются соотношением

$$L \cdot n = \text{const}, \quad (1)$$

где L — коэффициент поглощения, выраженный в раз/мм, а n — показатель степени при основании 10 для объемного удельного электрического сопротивления ρ в Ом·м. Для кривой 1 $L \cdot n = 30$, а для кривой 2 $L \cdot n = 20$.

Рассмотрим влияние диэлектрической проницаемости на поглощение и диэлектрические потери на примере композитов на основе керамики из нитрида алюминия с добавками карбида кремния AlN—SiC (№ 5, 6, 7) и молибдена AlN—Mo (№ 8, 9, 10).

Как видно из рис. 2, а, в исследованных поглотителях существует однозначная зависимость — большему уровню поглощения соответствует большее значение диэлектрической проницаемости. Аналогично ведет себя и тангенс угла диэлектрических потерь (см. рис. 2, б). При одинаковой диэлектрической проницаемости поглотители с добавкой карбида кремния имеют боль-

ший уровень поглощения, чем поглотители с добавкой молибдена, а при одном и том же поглощении диэлектрическая проницаемость у них меньше. Например, при $\epsilon = 32$ для AlN—SiC (№ 6) $L = 5,0 \pm 0,2$ дБ/мм, а для AlN—Mo (№ 8) $L = 3,5 \pm 0,2$ дБ/мм.

Подводя итог проведенным исследованиям материалов-поглотителей, можно сделать вывод о том, что поглощение всегда прямо пропорционально диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь и обратно пропорционально удельному электрическому сопротивлению.

Известно, что уровень поглощения СВЧ-энергии в двухфазных композитах увеличивается с ростом концентрации проводящей фазы. Учитывая эту закономерность, можно записать следующее соотношение:

$$L \approx c \epsilon \operatorname{tg} \delta / \rho, \quad (2)$$

где c — концентрация проводящей фазы в % по объему.

Соотношение (2) позволяет по известным значениям концентрации поглощающей фазы, диэлектрической проницаемости, тангенса потерь и электрического сопротивления композита оценить величину поглощения в нем, а также сравнить между собой разные материалы поглотителей для их использования в разрабатываемых СВЧ-приборах средней и высокой выходной мощности.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что для материалов — поглотителей СВЧ-энергии существует разграничение по уровню поглощения и соответствующему этому уровню объемному удельному электрическому сопротивлению. Если необходимо, чтобы материал поглотителя проявлял свойства диэлектрика, т. е. имел сопротивление 10^{12} Ом·м, то в этом случае поглощение будет на уровне $3,5 \pm 0,5$ дБ/мм. Если же главным требованием к материалу является макси-

мальное поглощение $6,5 \pm 1,0$ дБ/мм, то при этом его объемное удельное электрическое сопротивление будет равно $(4-5) \cdot 10^5$ Ом·м.

Обнаруженное постоянство произведения $L \cdot \rho$ позволяет прогнозировать минимальный и максимальный уровни поглощения СВЧ-энергии в двухфазных композитах на основе нитрида алюминия с добавками молибдена или карбида кремния, исходя из измеренного объемного электрического сопротивления.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Павлова М. А., Рыбкин В. Н., Немогай И. К. Поглотители СВЧ-энергии и их соединения с металлами // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. — 2009. — Вып. 4. — С. 42—47.
2. ТСО.027.029 ТУ. Технические условия на материал КТ-30.
3. Бухарин Е. Н., Власов А. С., Алексеев А. А. Новые высокотеплопроводные объемные СВЧ-поглотители // Электронная техника. Сер. Материалы. — 1988. — Вып. 6. — С. 66—70.
4. Поздняков Л. В., Селихова Т. Ю. Поглотители энергии в электровакуумных СВЧ-приборах. Ч. II. Методика расчета и измерения // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. — Москва: ЦНИИ «Электроника», 1978. — Вып. 3. — 72 с.
5. Часнык В.И. Влияние структурной иерархии частиц проводящей фазы в материале объемного поглотителя на процесс поглощения СВЧ-энергии // Электроника и связь. — 2011. — № 1. — С. 43—47.
6. Часнык В.И., Фесенко И.П. Теплопроводность внутривакуумных объемных поглотителей СВЧ-энергии // Техника и приборы СВЧ. — 2011. — № 2. — С. 47—51.
7. Chasnyk V.I. High absorption of the microwave energy in a system with strongly elongated molybdenum grains in aluminum nitride matrix at frequencies of 9,5—10,5 GHz // J. Super. Mat. — 2012. — Vol. 34, N 1. — P. 71—73.
8. Часнык В. И., Фесенко И. П. Поглотители СВЧ-энергии с высокой теплопроводностью на основе нитрида алюминия и карбида кремния с добавками молибдена // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 1. — С. 11—14.

Дата поступления рукописи
в редакцию 10.05 2014 г.

В. И. ЧАСНИК

Україна, м. Київ, НДІ «ОРІОН».
E-mail: ndiorion@tsua.net

ПОГЛИНАЧІ НВЧ-ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ НІТРИДУ АЛЮМІНІЮ З ВИСОКИМ РІВНЕМ ПОГЛИНАННЯ

Представлено результати експериментальних досліджень композитів на основі нитриду алюмінію з добавками молибдену та карбиду кремнію з високим поглинанням НВЧ-енергії. Показано, що в об'ємних поглиначах існує взаємозв'язок між високим рівнем поглинання та питомим об'ємним електричним опором матеріалу: максимальному поглинанню $6,5 \pm 1,0$ дБ/мм відповідає опір $(4-5) \cdot 10^5$ Ом·м. Для матеріалу поглинач з властивостями діелектрика з опором 10^{12} Ом·м рівень поглинання дорівнює $3,5 \pm 0,5$ дБ/мм.

Ключові слова: об'ємний поглинач, коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії, питомий об'ємний електричний опір, композит, нітрид алюмінію.

MICROWAVE ENERGY ATTENUATORS ON THE BASIS OF ALUMINUM NITRIDE WITH HIGH LEVEL OF MICROWAVE ENERGY ABSORPTION

Results of experimental studies of aluminum nitride based composites with addition of silicon carbide and molybdenum having high microwave absorption are presented. The interconnection between high level of absorption and volume electrical resistance was observed: maximum absorption of $6.5 \pm 1,0$ dB/mm corresponds to the electrical resistance of $(4-5) \cdot 10^5$ Ohm-m. Level of absorption of $3.5 \pm 0,5$ dB/mm is revealed for the dielectric material with electrical conductivity of 10^{12} Ohm-m. The patterns detected during the study allow to predict the minimum and maximum levels of absorption of microwave energy in the two-phase composites based on aluminum nitride with molybdenum or silicon carbide, based on the measured volume of electrical resistance.

Keywords: volume attenuators, absorption factor of electromagnetic energy, composite, volume electrical resistance, aluminum nitride.

REFERENCES

1. Pavlova M. A., Rybkin V. N., Nemogai I. K. [Microwave energy absorbers and their compounds with metals]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. SVCh-tekhnika*, 2009, iss. 4, pp. 42-47. (in Russian)
2. TCO.027.029 TY. [Technical specifications for CT-30 material]
3. Bukharin E. N., Vlasov A. S., Alekseev A. A. [New highly voluminous microwave absorbers]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Materialy*, 1988, iss. 6, pp. 66-70. (in Russian)
4. Pozdnyakov L. V., Selikhova T. Yu. [Energy absorbers in vacuum microwave devices. Chapter II. Methods for calculating and measuring] *Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. 1. Elektronika SVCh*, 1978, iss. 3, 72 p. (in Russian)
5. Chasnyk V.I. [The impact of structural hierarchy of particles of conducting phase in the volume absorber material on the absorption process of microwave energy]. *Elektronika i svyaz'*, 2011, no 1, pp. 43-47. (in Russian)
6. Chasnyk V.I., Fesenko I.P. [Thermal conductivity of vacuum volume attenuators of microwave energy]. *Tekhnika i pribory SVCh*, 2011, no 2, pp. 47-51. (in Russian)
7. Chasnyk V.I. High absorption of the microwave energy in a system with strongly elongated molybdenum grains in aluminum nitride matrix at frequencies of 9,5–10,5 GHz. *J. Super. Mat.*, 2012, vol. 34, no 1, pp. 71-73.
8. Chasnyk V. I., Fesenko I. P. [Microwave energy attenuators of high thermal conductivity based on AlN and SiC with addition of molybdenum]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2014, no 1, pp. 11-14. (in Russian)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Гилмор-мл. А. С. Лампы с бегущей волной.— Москва: Техносфера, 2013.

Книга основана на материалах лекций и семинаров по СВЧ-лампам, которые автор многократно представлял в ведущих фирмах и университетах США. В ней сосредоточены базовые знания по теории и технике наиболее востребованного в течение многих, в том числе и последних десятилетий, прибора — лампы с бегущей волной (ЛБВ). Книга написана доступным для широкого круга читателей и образным языком, методически сбалансирована. Широко используемые цитаты из работ известных специалистов и обширная библиография способствуют более глубокому восприятию излагаемого материала. Книга может быть полезна как для подготовки студентов старших курсов и аспирантов вузов, так и специалистов, занятых разработкой и применением ЛБВ в различных областях радиоэлектроники.



Р. Л. ПОЛИТАНСКИЙ¹, А. Д. ВЕРИГА²

Украина, ¹Национальный университет «Львовская политехника»,

²Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: polroos@mail.ru, veriga@ukr.net

КОДЕР И ДЕКОДЕР ФРАКТАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ГРЕБЕНЧАТОЙ СТРУКТУРЫ

Предложены схемотехнические решения и реализованы блоки кодирования и декодирования фрактальных сигналов гребенчатой структуры. Аппаратная реализация модулей управления этих блоков осуществлена на базе микроконтроллера PIC18F2550. Фрактальный сигнал формируется из байтовых последовательностей, которые записаны в памяти микроконтроллера в виде таблиц. Декодирование принятого сигнала осуществляется по его среднему значению.

Ключевые слова: фрактал, микроконтроллер, передатчик, кодер, приемник, декодер.

Фрактальные сигналы — новый класс широкополосных сигналов, которые могут быть использованы в помехоустойчивых и защищенных системах связи [1–5].

Следует отметить, что для практической реализации фрактальных сигналов, предложенных авторами [2–6], требуется использование дорогостоящей элементной базы (например, отладочной платы SPARTAN-3 с программируемой логической интегральной схемой XILINX SC3S200), а для воспроизведения сигнала с малой погрешностью восстановления разрядность схемы должна составлять не менее 12 битов [2].

Предложенные нами фрактальные сигналы гребенчатой структуры (**ФСГС**) состоят из электрических импульсов прямоугольной формы одинаковой длительности с разной амплитудой [7]. Математическая модель таких сигналов имеет следующий вид:

$$x(t) = \sum_{l=0}^w A_l \cdot \left(\sum_{k=1}^{2^{w-l}} U_l^k(t) \right) = \\ = \sum_{l=0}^w A_l \cdot \left\{ \sum_{k=1}^{2^{w-l}} [\Theta(t - t_l^k) - \Theta(t - t_l^k - \tau)] \right\},$$

где w — порядок фрактала;

l — номер уровня фрактала;

k — последовательный номер импульса l -го уровня во фрактале;

A_l — амплитуда элементарного импульса l -го уровня;

$U_l^k(t)$ — k -й прямоугольный импульс l -го уровня единичной амплитуды;

t_l^k — момент начала импульса $U_l^k(t)$;

$\Theta(t)$ — функция Хевисайда;

τ — длительность элементарного импульса (одинаковая для всех импульсов).

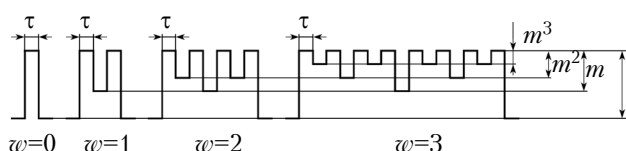


Рис. 1. Последовательные этапы формирования фрактальных импульсов из элементарных импульсов с одинаковой длительностью с порядками фрактала w от 0 до 3

Рис. 1. Последовательные этапы формирования фрактальных импульсов из элементарных импульсов с одинаковой длительностью с порядками фрактала w от 0 до 3

Фрактал w -го порядка состоит из $2^{w+1}-1$ элементарных прямоугольных импульсов одинаковой длительности τ , которые могут быть разделены на $w+1$ уровня по их значениям. Амплитуда импульсов элементарных фрагментов соответствующего уровня равна m^l . Структура фрактальных сигналов первых четырех порядков с коэффициентом формирования m , равным $1/2$, приведена на рис. 1.

Целью настоящей работы является разработка кодера и декодера информационных сигналов, сформированных с использованием предложенных ФСГС, на основе микроконтроллеров.

Практическая реализация кодера и декодера

Кодер и декодер предложенных фрактальных сигналов состоят из идентичных модулей управления, а их управляемые модули имеют различные схемотехнические решения [7, 8].

Модуль управления (рис. 2) осуществляет формирование и распознавание сигналов, а также осуществляет функцию обмена данными с компьютером.

Основным элементом модуля управления является микроконтроллер PIC18F2550 (DD1) фирмы MicroChip [9], выполняющий функции аппаратного программируемого ядра. Его тактовая частота задается внешним генератором DA1 (KXO-210 40.0MHz) [10].

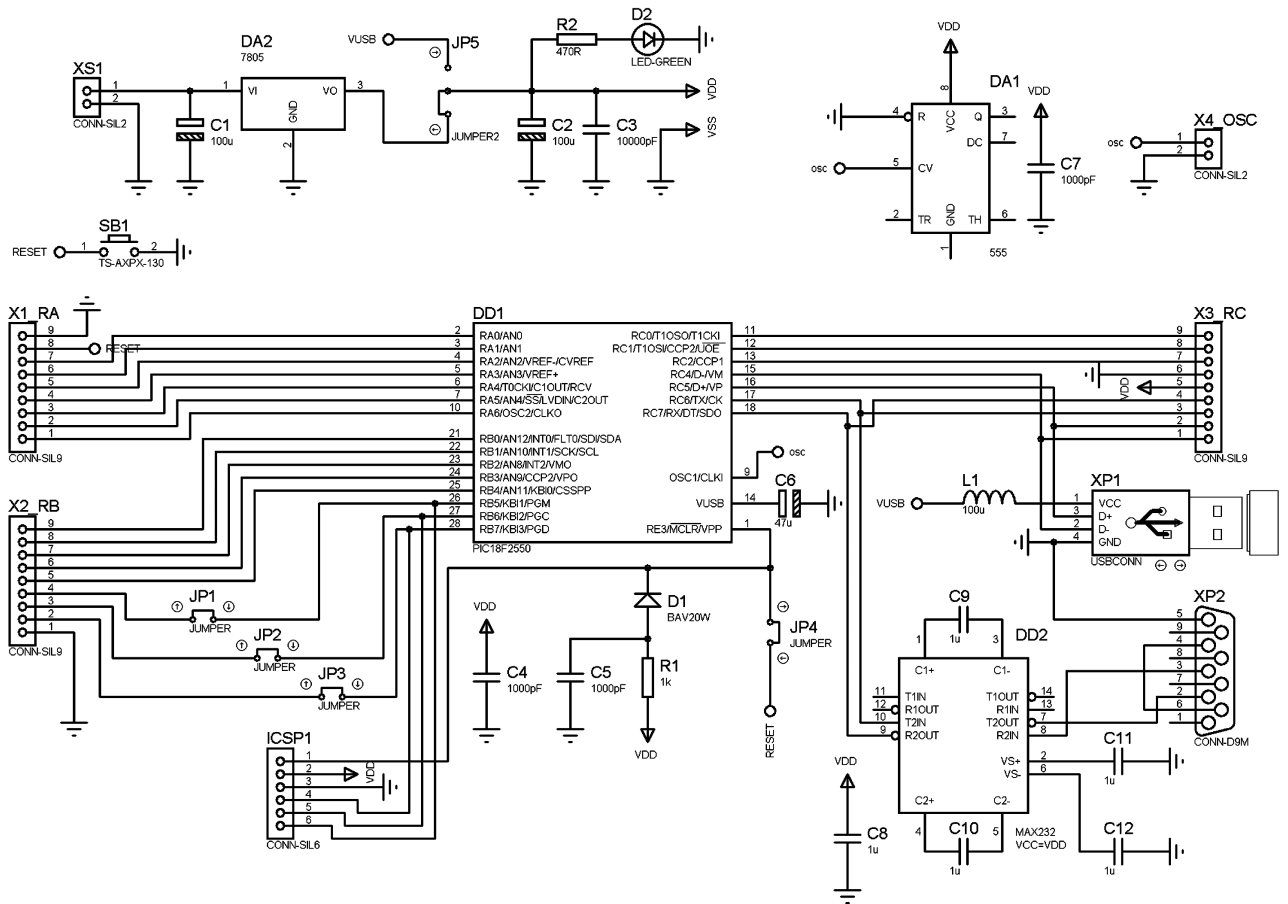


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема модуля управления кодера и декодера

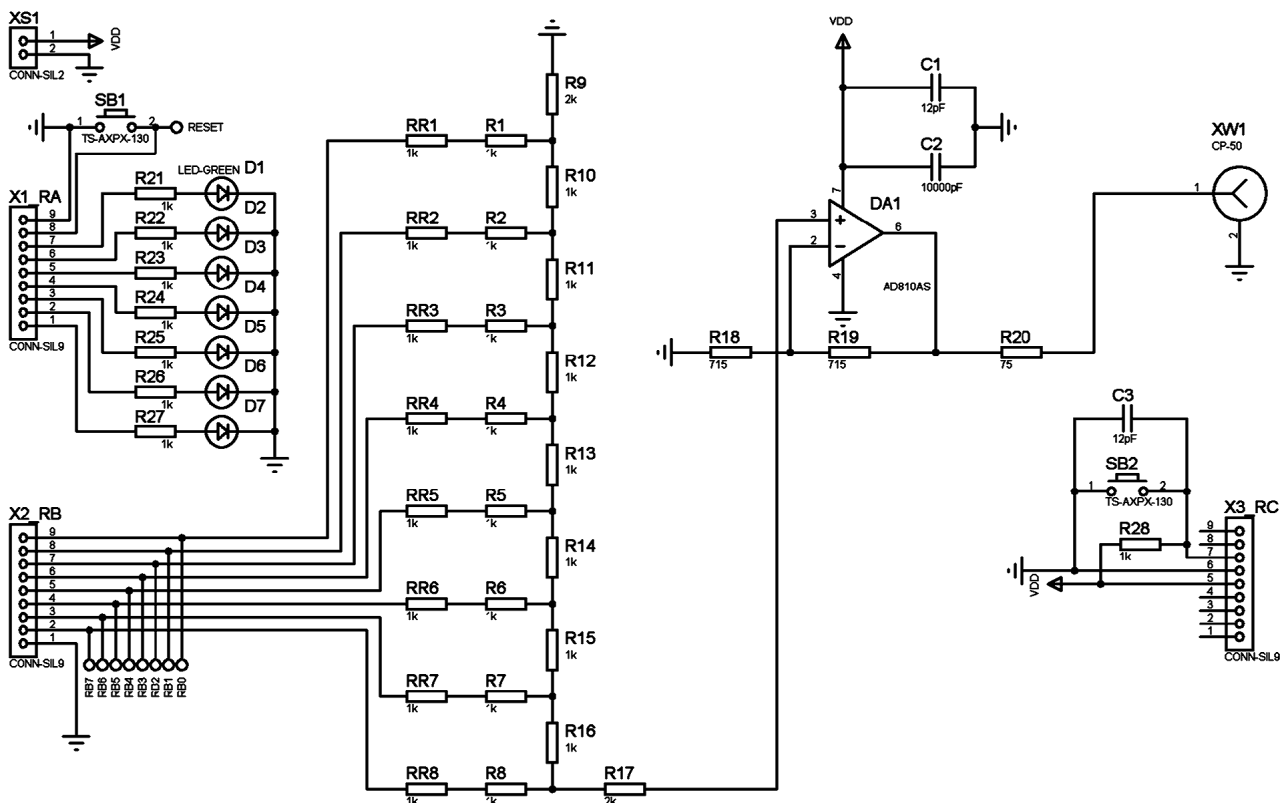


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема управляемого модуля кодера

Связь микроконтроллера с компьютером может осуществляться через порты USART (разъем *XP2*) и USB (разъем *XP1*). Микросхема MAX232 [11] (*DD2*) осуществляет согласование интерфейса RS-232 (COM-порта компьютера) с портом USART микроконтроллера.

В схеме модуля управления используются микросхемы с однополярным питанием +5 В, которое осуществляется интегральным стабилизатором LM7805 [12]. При этом имеется возможность запитывать схему кодера от источника напряжением до +15 В.

Принципиальная схема управляемого модуля кодера приведена на **рис. 3**. Сочетание управляющего и управляемого модулей кодера позволяет

генерировать фрактальные сигналы гребенчатой структуры с произвольным порядком фрактала.

Последовательности кодов фрактала соответствующего уровня, выбираемые из таблицы, хранящейся в памяти микроконтроллера, преобразовываются во фрактальный сигнал с помощью резисторов ($RR1-RR8$, $R1-R16$), собранных в матрицу $R-2R$. Это позволяет реализовать наиболее быстродействующую и простую схему параллельного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) [13]. Высокое значение отношения сопротивления транзисторных ключей порта *RB* микроконтроллера в закрытом и открытом состояниях ($R_3/R_0=2\cdot 10^6$) обеспечивает возможность их использования в качестве

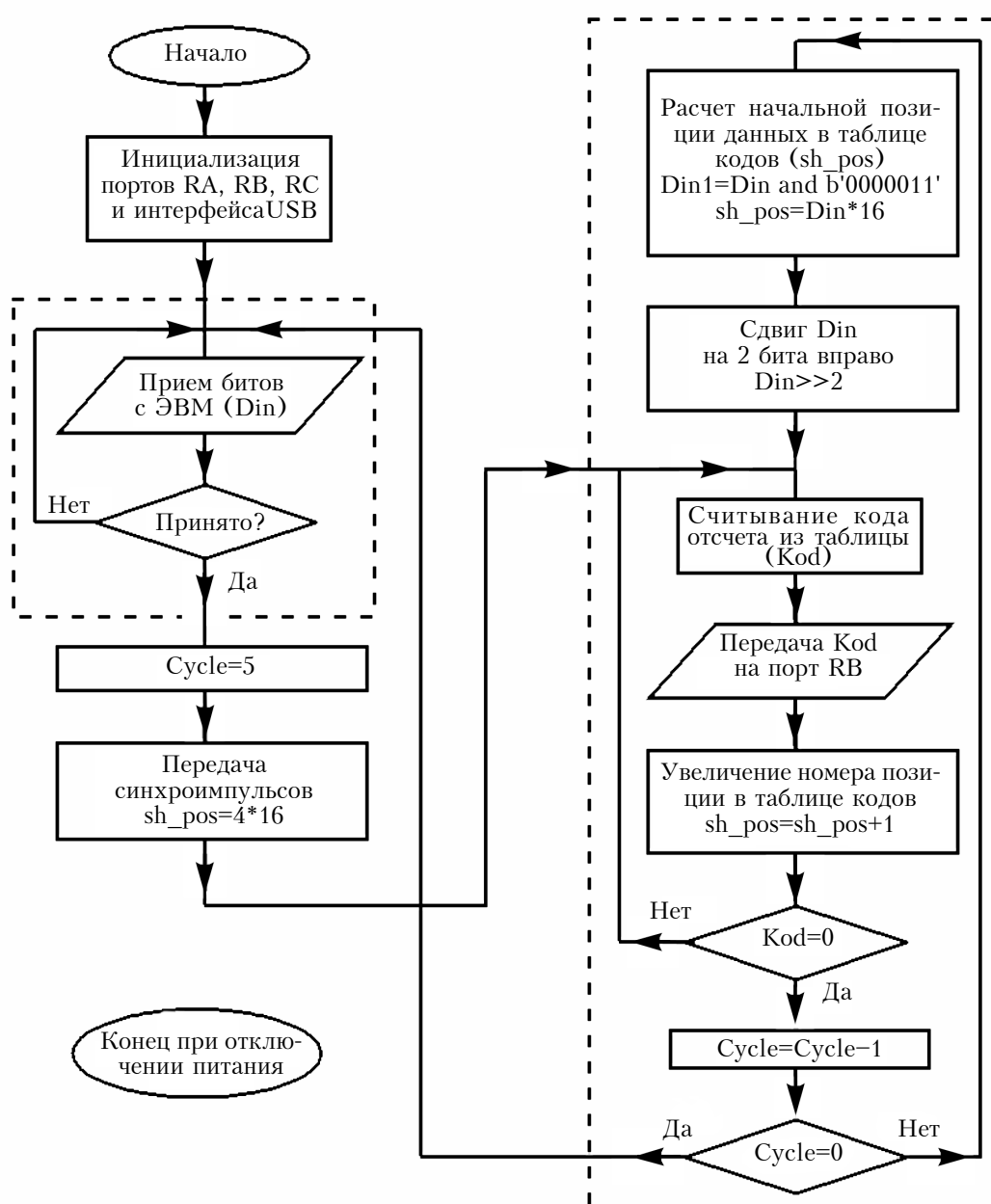


Рис. 4. Блок-схема алгоритма работы программы контроллера

коммутаторов тока в ЦАП [9]. При этом необходимая разрядность кодера и декодера должна быть на единицу больше порядка фрактала ($q_{АПЧ} = w + 1$). Удовлетворительная линейность преобразования «код — напряжение» обеспечивается минимальным разбросом значений сопротивления резисторов матрицы за счет использования резисторов одинакового номинала, принадлежащих одной серии.

Согласование выходного сопротивления $R-2R$ -матрицы с волновым сопротивлением коаксиального кабеля, используемого для передачи информационных фрактальных сигналов, достигалось применением операционного усилителя AD810 (DA1) [14].

Кодер системы осуществляет формирование и преобразование во фрактальный сигнал заданного порядка последовательности двоичных параллельных кодов на выходе порта RB в соответствии с информационными битами, поступающими от компьютера.

Длительность фрактальных сигналов зависит от тактовой частоты и длины блока программы, который формирует необходимый сигнал. С целью экономии временных затрат микроконтроллера на формирование фрактальных сигналов использовали таблицу рассчитанных значений амплитуд элементарных прямоугольных импульсов, составляющих их структуру.

Выборка значений последовательности отсчетов фрактала из соответствующей строки таблицы производится в соответствии с битами входного информационного байта, принимаемого с компьютера. Это позволяет обеспечить минимально возможную для используемого семейства микроконтроллеров (МК) длительность фрактальных импульсов. Алгоритм работы «защитой» в контроллер программы приведен на **рис. 4**.

Алгоритм предусматривает кодирование передаваемой информации двухбитовыми символами. Обеспечение распознавания начала передачи каждого байта по каналу связи осуществляется передачей сигнала синхронизации.

Блок выборки последовательности кодов, соответствующих заданным уровням фрактала, из таблицы написан на языке программирования «ассемблер» с минимальным количеством команд, что позволяет формировать фрагменты импульсов длительностью 20 мкс при частоте тактового генератора микроконтроллера 4 МГц. Переход к генерации следующего фрактального импульса осуществляется выполнением дополнительных команд в течение паузы между импульсами, составляющей 40 мкс.

В декодере микроконтроллер осуществляет прием и декодирование принятых фрактальных сигналов с последующей их передачей на ком-

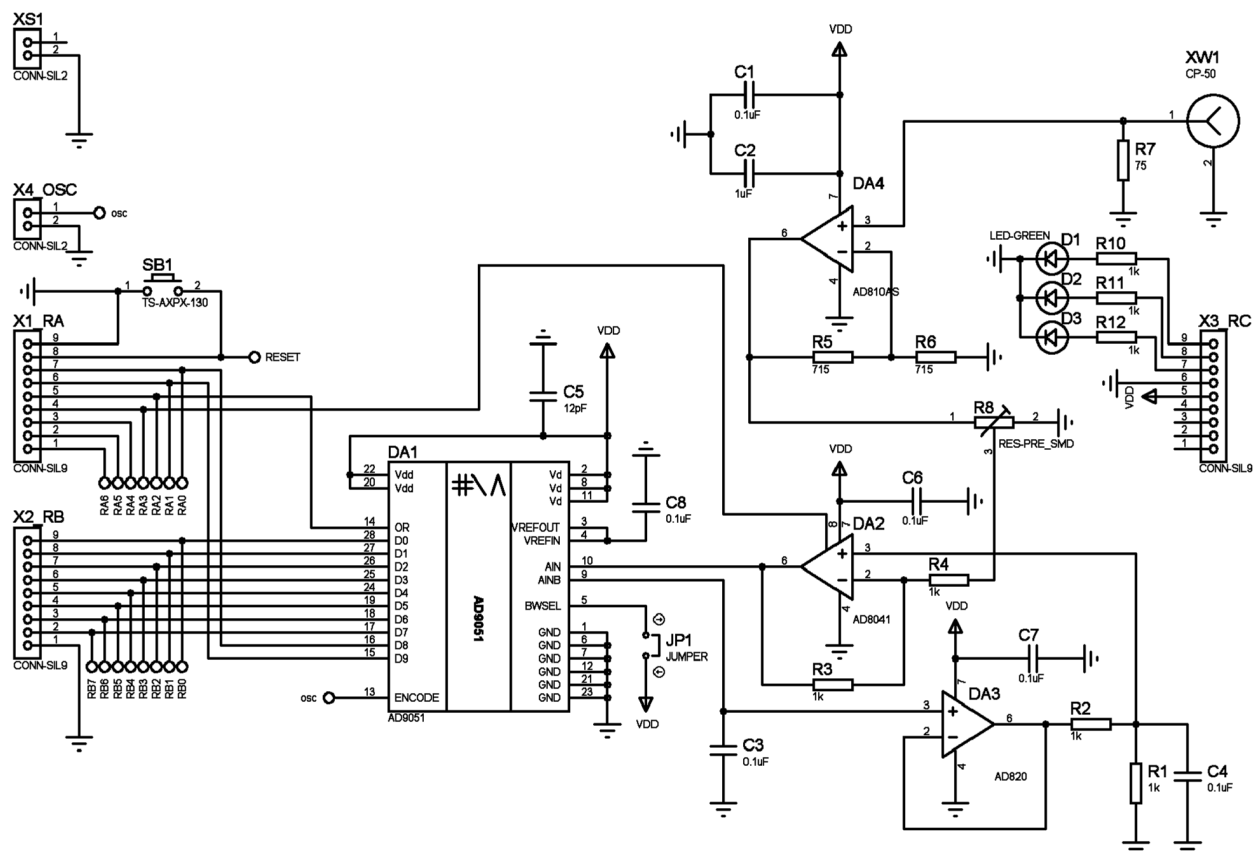


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема управляемого модуля декодера

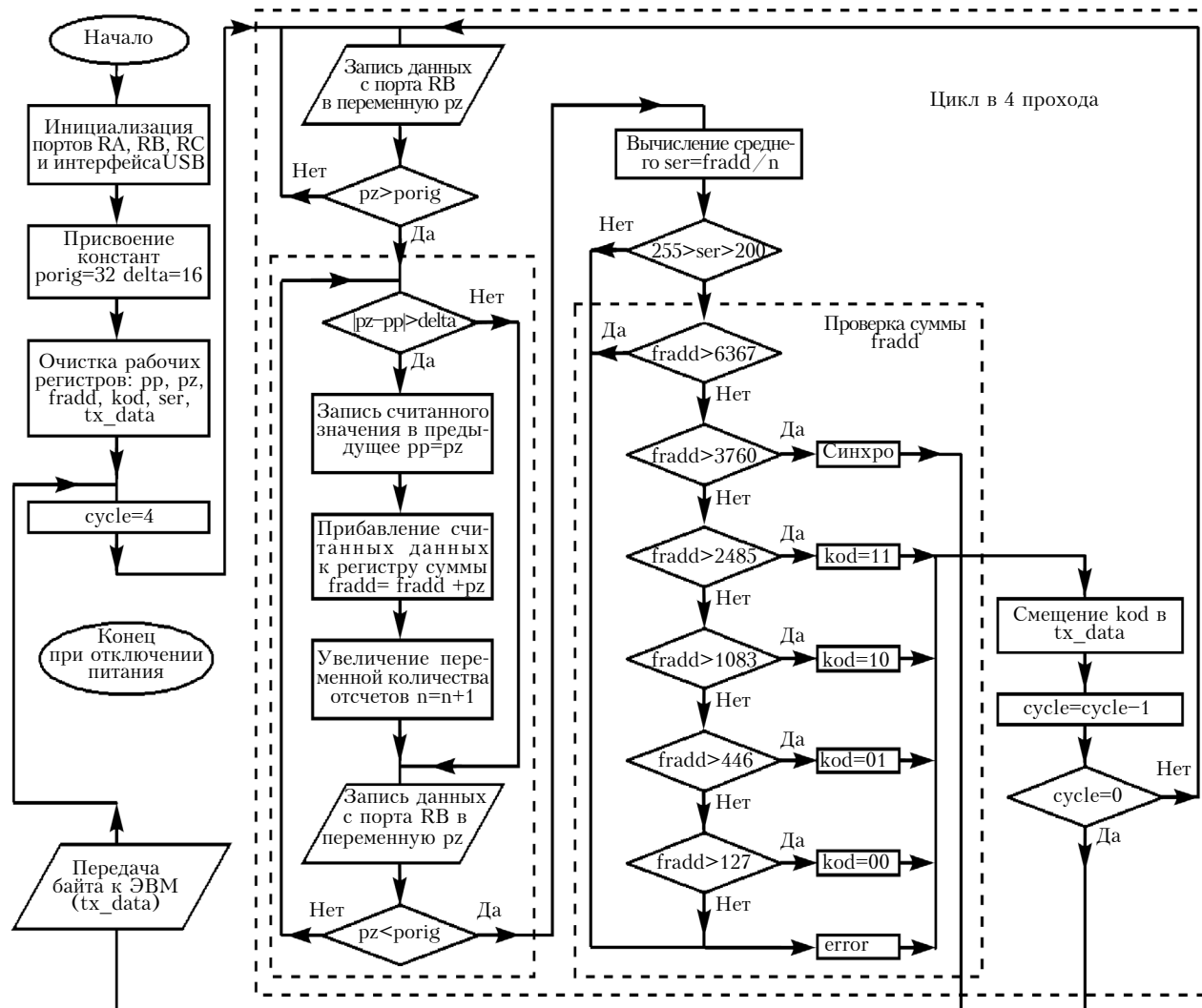


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы программы модуля управления декодера

пьютер. Схема управляемого модуля декодера фрактальных сигналов гребенчатой структуры приведена на **рис. 5**.

Преобразование сигнала из аналоговой формы в цифровую осуществлялось с помощью АЦП AD9051 фирмы Analog Devices [15] с необходимым для декодирования быстродействием. Схема входа на операционных усилителях AD820 [16] и AD8041 [17] позволяет организовать преобразование однополярного сигнала. Тактирование АЦП осуществляется от тактового генератора микроконтроллера.

Согласование волнового сопротивления коаксиального кабеля с входным сопротивлением схемы осуществляется с помощью операционного усилителя AD810 (DA4) [14].

Индикация режимов работы схемы осуществляется светодиодами.

Алгоритм работы программы микроконтроллера модуля управления декодера представлен на **рис. 6**.

Разработанный алгоритм обеспечивает определение порядка фрактального импульса. Декодирование фрактальных импульсов гребенчатой структуры осуществляется по значению суммы амплитуд элементарных импульсов, составляющих фрактальный сигнал. Отслеживание начала и завершения передачи фрактального импульса и завершается проверкой отличия кода на входе порта RB от нуля.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Экспериментальные сигналы, генерированные разработанным кодером фрактальных сигналов гребенчатой структуры, исследовались с помощью осциллографа ТЕКТРОНИХ (**рис. 7**). Тактовая частота контроллера, задаваемая включенным в схему кварцевым резонатором, составляла 4 МГц.

Минимальная длительность фрагментов генерированных фрактальных импульсов при тактовой частоте контроллера 40 МГц составляет

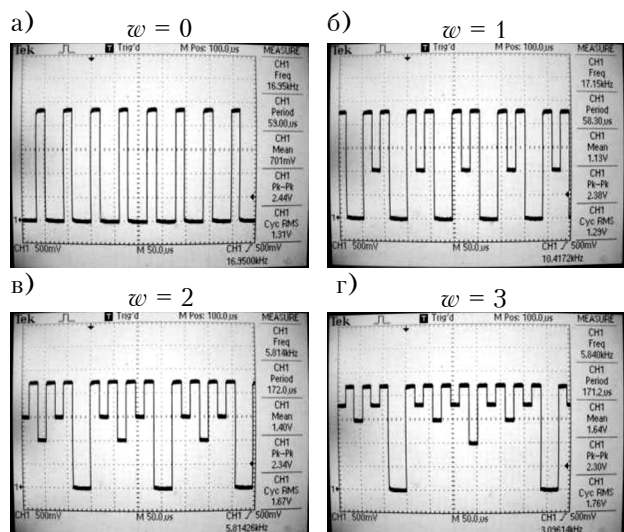


Рис. 7. Осциллограммы генерированных фрактальных сигналов с различным порядком фрактала w

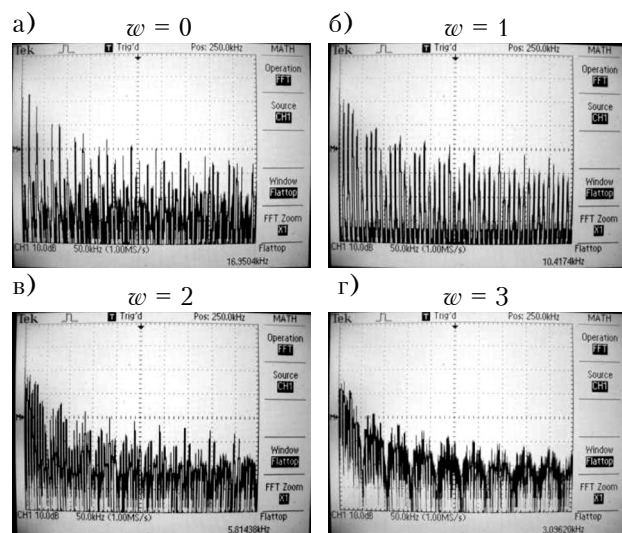


Рис. 8. Спектры фрактальных сигналов гребенчатой структуры, генерированных предложенной схемой, для различных порядков фрактала w

2 мкс. Это обеспечивает скорость передачи данных около 80000 бит/с при кодировании логической единицы фракталом первого порядка, а логического нуля — его отсутствием. При кодировании логических единицы и нуля фракталами разных порядков скорость передачи информации определяется структурой информационных последовательностей (длиной фрагментов, состоящих из логических нулей и единиц). Кодирование информационных символов разрядности n битов осуществляется количеством фрактальных сигналов разного порядка, равным 2^n .

Экспериментальные амплитудные спектры исследованных сигналов приведены на рис. 8.

Спектры фрактальных сигналов исследовались в диапазоне частот 0—500 кГц. Как и сле-

довало ожидать, полученные спектры соответствуют огибающей спектра прямоугольного импульса. На основании экспериментально полученных спектров расчетные значения базы фрактальных сигналов порядков 0; 1; 2 и 3 составляли 0,9; 2,9; 5,9 и 7,8 соответственно. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что сформированные с помощью предложенного кодера фрактальные сигналы являются широкополосными и могут быть использованы в системах помехоустойчивой передачи информации [6].

Тестирование кодера и декодера производилось передачей текстовой информации между двумя компьютерами. Связь между блоками кодера и декодера осуществлялась по коаксиальному кабелю длиной 10 м с волновым сопротивлением 75 Ом. Было установлено, что передаваемый текст из тысячи символов декодируется без ошибок.

Выводы

Прямоугольная форма элементарных фрагментов фрактального импульса упрощает способ его формирования и аппаратную реализацию кодера и декодера. Для хранения вектора отсчетов ФСГС порядка w достаточно 2^w байтов. Малая длина вектора сигнала упрощает требования к тактовой частоте схемы. Минимальная разрядность ЦАП, необходимая для генерации ФСГС четвертого порядка, равняется четырем битам. Применение такого импульса устраняет необходимость использования аналогового сглаживающего фильтра на выходе цифро-аналогового преобразователя.

Предложенные схемы кодера и декодера фрактальных сигналов гребенчатой структуры работают на основе микроконтроллеров «среднего семейства» фирмы Microchip. Максимальное быстродействие схем обеспечивает произведенная оптимизация алгоритмов и кодов программ, «защитых» в микроконтроллерах кодера и декодера. Минимальное значение длительности элементарных фрагментов импульсов составляет 20; 4; 2 мкс при тактовых частотах 4; 20; 40 МГц соответственно.

Скорость передачи данных ограничивается временем декодирования. При тактовой частоте 40 МГц достигнутая скорость передачи данных между блоками составила в среднем 16000 бит/с. Увеличить скорость передачи данных можно путем использования микропроцессорных схем с более высокой тактовой частотой или программированных логических интегральных схем, а также оптимизацией способа детектирования.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Федер Е. Фракталы. — Москва: Мир, 1991.
2. Bolotov V. N., Kolesnikov S. E., Tkach Yu. V., Tkach Ya. Yu., Khupchenko P. V. Fractal communication system // Electromagnetic Phenomena. — 2007. — Vol. 7, N 1 (18).
3. Новикова О. Б. Фрактальный сплайн-модель широкополосного сигнала // Вісник Національного

університету «Львівська політехніка». Радіoeлектроніка та телекомунікації. — 2012. — № 738. — С. 28–33.

4. Лазоренко О. В., Потапов А. А., Черногор Л. Ф. Фрактальные сверхширокополосные сигналы // В кн.: Струков А. В., Потапов А. А., Черногор Л. Ф. и др. Информационная безопасность: методы шифрования. — Кн. 7. Москва: Радиотехника, 2011. — С. 151–187.

5. Політанський Р. Л., Климаш М. М. Метод кластерного кодування // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — Т. 5, № 3(39). — С. 50–53.

6. Болотов В. Н., Ткач Ю. В. Выделение фрактальных сигналов в условиях сложной электромагнитной обстановки // Электромагнитные явления. — 2003. — Т. 3, № 2(10). — С. 211–227.

7. Верига А. Д., Політанський Р. Л. Генератор фрактальних сигналів типу „прямокутний імпульс” на мікроконтролері // Праці IV Міжнарод. науково-практич. конферен. „Обробка сигналів і негауссівських процесів”. — Україна, м. Черкаси. — 2013. — С. 132–134.

8. Верига А. Д., Політанський Р. Л. Декодер фрактальних сигналів гребінкової структури // Матеріали III Міжнарод. науково-практич. конферен. „Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів

телекомунікації, нано- та мікроелектроніки”. — Україна, м. Чернівці. — 2013. — С. 84–85.

9. ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30292c.pdf

10. http://www.geyer-electronic.com/uploads/tx_userartikelfrequenz/GEYER-KXO-210_02.pdf

11. www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf

12. www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7805.pdf

13. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника. — СПб: БХВ-Петербург, 2004.

14. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD810.pdf

15. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9051.pdf

16. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD820.pdf

17. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8041.pdf

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.03 2014 г.

Р. Л. ПОЛІТАНСЬКИЙ, А. Д. ВЕРИГА

Україна, м. Львів, Національний університет «Львівська політехніка»;
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: polroos@mail.ru, veriga@ukr.net

КОДЕР І ДЕКОДЕР ФРАКТАЛЬНИХ СИГНАЛІВ ГРЕБІНЧАСТОЇ СТРУКТУРИ

Запропоновано схематехнічні рішення і реалізовано блоки кодування і декодування фрактальних сигналів гребінчастої структури. Апаратна реалізація модулів управління цих блоків здійснена на базі мікроконтролера PIC18F2550. Фрактальний сигнал формується з байтових послідовностей, які записані в пам'яті мікроконтролера у вигляді таблиць. Декодування прийнятого сигналу здійснюється за його середнім значенням.

Ключові слова: фрактал, мікроконтролер, передавач, кодер, приймач, декодер.

DOI: 10.15222/TKEA2014.4.13
UDC 004.312.26

R. L. POLITANSKYI¹, A.D. VERYGA²

Ukraine, ¹Lviv Polytechnic National University;
²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

E-mail: polroos@mail.ru, veriga@ukr.net

CODER AND DECODER OF FRACTAL SIGNALS OF COMB-TYPE STRUCTURE

The article presents a coder and decoder of fractal signals of comb-type structure (FSCS) based on microcontrollers (MC). The coder and decoder consist of identical control modules, while their managed modules have different schematic constructions. The control module performs forming or recognition of signals, and also carries out the function of information exchange with a computer. The basic element of the control module is a PIC18F2550 microcontroller from MicroChip.

The coder of the system forms fractal signals of a given order according to the information bits coming from the computer. Samples of the calculated values of the amplitudes of elementary rectangular pulses that constitute the structure of fractal pulses are stored in the memory of the microcontroller as a table. Minimum bit capacity of the DAC necessary for the generation of FSCS of fourth order is four bits. The operation algorithm, “wired” into the controller of the program, provides for encoding of the transmitted information by two-bit symbols. Recognition of the start of transmission of each byte in communication channel is performed by the transmission of the timing signal.

In a decoder the microcontroller carries out reception and decoding of the received fractal signals which

are then transmitted to the computer. The developed algorithm of the program for the microcontroller of the decoder is carried out by determination of order of fractal impulse after the value of sum of amplitudes of elementary impulses, constituents fractal signal.

The programs for coder and decoder are written in "C". In the most critical places of the program influencing on the fast-acting of chart "assembler" insertions are done.

The blocks of the coder and decoder were connected with a coaxial 10 meters long cable with an impedance of 75 Ohm.

The signals generated by the developed coder of FSCS, were studied using a digital oscillograph. On the basis of the obtained spectrums, it is possible to draw a conclusion, that the fractal signals formed by the coder are wideband and can be used in noise-resistant and protected communication systems.

Keywords: fractal, microcontroller, transmitter, coder, receiver, decoder.

REFERENCES

1. Feder E. [Fraktals] Moscow, Mir, 1991, 261 p. (in Russian)
2. Bolotov V. N., Kolesnikov S. E., Tkach Yu. V., Tkach Ya. Yu., Khupchenko P. V. Fractal Communication System. *Electromagnetic Phenomena*. 2007, vol. 7, no 1 (18), pp. 174-179.
3. Novikova O. B. Fraktal'nii spline-model' shirokospigovogo signalu [Fractal spline-model of wideband signal] *Visnik Natsional'nogo universitetu «Lviv's'ka politekhnika»*. *Radioelektronika ta telekomunikatsiyi*. 2012, no 738, pp. 28-33. (in Russian)
4. Lazorenko O. V., Potapov A. A., Chernogor L. F. Fraktal'nye sverkhshirokopolosnye signaly [Fractal UWB signals]. In book: Strukov A. V., Potapov A. A., Chernogor L. F. et al. *Informatsionnaya bezopasnost': metody shifrovaniya* [Informative safety: methods of encoding]. Book 7. Moscow, Radio engineering, 2011, pp. 151-187. (in Russian)
5. Politans'kii R. L., Klimash M. M. Metod klaster'nogo koduvannya [Cluster coding method]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*. 2012, vol. 5, no 3(39), pp. 50-53. (in Russian)
6. Bolotov V. N., Tkach Yu. V. Vydelenie fraktal'nykh signalov v usloviyakh slozhnoi elektromagnitnoi obstanovki [Extracting of fractal signals in conditions of complex electromagnetic conditions] *Elektromagnitnye yavleniya*. 2003, vol. 3, no 2(10), pp. 211-227. (in Russian)
7. Veriga A. D., Politans'kii R. L. Generator fraktal'nykh signaliv tipu «pryamokutneyi impuls» na mikrokontroleri [Generator of the fractal signals of „rectangular pulse” type on microcontroller]. *Proceed. of the IV international scientific-practical conference «Processing of signals and non-gaussian processes»*. Ukraine, Cherkasy. 2013, pp. 132-134. (in Russian)
8. Veriga A. D., Politans'kii R. L. Dekoder fraktal'nykh signaliv grebinkovoyi strukturi [Decoder of fractal signals of comb structure]. *Proceed. of the III international scientific-practical conference «Physical and technological problems of radio engineering devices, telecommunication, nano- and micro-electronics»*. Ukraine, Chernivtsi. 2013, pp. 84-85. (in Russian)
9. ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30292c.pdf
10. http://www.geyer-electronic.com/uploads/tx_userartikelfrequenz/GEYER-KXO-210_02.pdf
11. www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf
12. www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7805.pdf
13. Ugryumov Ye. P. *Tsifrovaya shemotekhnika* [Digital circuitry]. St. Petersburg. BKhV-Peterburg, 2004.
14. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD810.pdf
15. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9051.pdf
16. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD820.pdf
17. www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8041.pdf

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

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

Это третье издание «Справочника по радиолокации». 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 текущего издания.



Д. т. н. Н. А. ФИЛИНЮК, к. т. н. Л. Б. ЛИЩИНСКАЯ, к. т. н. О. О. ЛАЗАРЕВ, Я. С. ТКАЧУК

Украина, Винницкий национальный технический университет

E-mail: rozhkova.yana@gmail.com

ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОРНЫЙ ДАТЧИК

Рассмотрена возможность построения трехпараметрического радиочастотного датчика. Разработана математическая модель, которая описывает взаимосвязь параметров датчика с параметрами первичных измерительных преобразователей. Исследованы основные зависимости параметров датчика, его функция преобразования и чувствительность. Результаты исследований и адекватность математической модели проверены экспериментальным путем.

Ключевые слова: радиочастотный датчик, обобщенный преобразователь иммитанса, полевой транзистор.

Генераторные датчики обеспечивают возможность дистанционного получения информации, а также простоту ее преобразования в цифровую форму [1]. Обычно это однопараметрические датчики, образованные комбинацией первичного измерительного преобразователя (ПИП) и генератора гармонических колебаний (см., например, [2]). Также имеют место разработки многопараметрических радиочастотных датчиков, в частности мультифункциональный сенсор для измерения двух ортогональных проекций вектора индукции магнитного поля и температуры [3]; беспроводная сенсорная платформа WISP [4], различные терморегуляторы [5] и т. д. Такие датчики имеют достаточно сложную конструкцию, дорогостоящие элементы и высокое энергопотребление. Двухпараметрические датчики не получили широкого применения и по той причине, что при их реализации возникает проблема неоднозначности выходного сигнала при измерении параметров ПИП. Поэтому с их помощью решаются специфические задачи, такие как, например, повышение чувствительности датчика за счет использования двух идентичных ПИП [6] или когда второй ПИП работает в режиме компенсации дестабилизирующего фактора [7]. Одним из решений указанной проблемы является построение многофункциональных измерительных преобразователей [8], использующих многоканальные системы или системы коммутации, что усложняет датчик и для радиочастотных датчиков является неэффективным. Тем не менее, проблема создания миниатюрных, экономичных многопараметрических радиочастотных датчиков для разных отраслей науки и производства остается актуальной.

Целью настоящих исследований является построение трехпараметрического радиочастотного

датчика СВЧ-диапазона малых размеров и простой конструкции, имеющего низкую стоимость и энергопотребление.

Схемотехническое обоснование

В основу построения датчика положен двухкаскадный трехпараметрический обобщенный преобразователь иммитанса (ОПИ) (рис. 1, а) [9]. В соответствии с теорией синтеза генераторных датчиков на основе ОПИ [7], преобразованный адмиттанс ОПИ

$$Y_{\text{вых}} = F([y^{(1)}], [y^{(2)}], Z_{Г1}, Z_{Г2}, Z_{Г3}) = \text{Re}(Y_{\text{вых}}) + j \cdot \text{Im}(Y_{\text{вых}}) \quad (1)$$

должен соответствовать требованиям

$$\text{Re}(Y_{\text{вых}}) < 0; \quad (2)$$

$$\text{Im}(Y_{\text{вых}}) < 0, \quad (3)$$

где $[y^{(1)}]$, $[y^{(2)}]$ — матрицы проводимости первого и второго каскадов ОПИ;

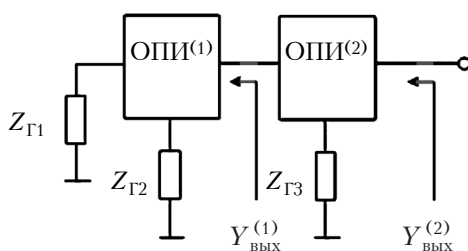
$Z_{Г1}$, $Z_{Г2}$, $Z_{Г3}$ — преобразуемые импедансы ПИП.

Как следует из (1), выполнение условий (2) и (3) зависит от характера преобразуемых импедансов и параметров адмиттансных матриц первого и второго каскадов ОПИ.

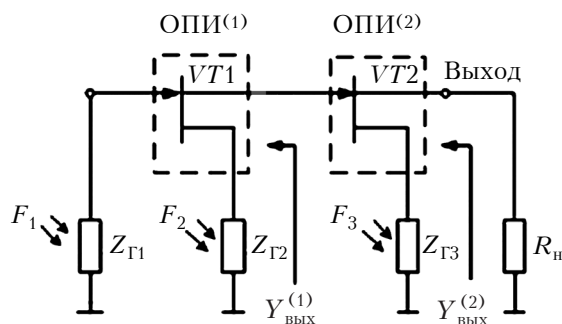
Если учесть, что среди современных ПИП наиболее широкую группу образуют иммитансные RLC-ПИП, возникает задача построения генераторного датчика с использованием индуктивного, емкостного и резистивного ПИП, импеданс которых ($Z_{Г1} \dots Z_{Г3}$) зависит от соответствующих физических возмущений ($F_1 \dots F_3$).

В качестве первого и второго каскадов используются активные четырехполюсники на

а)



б)



в)

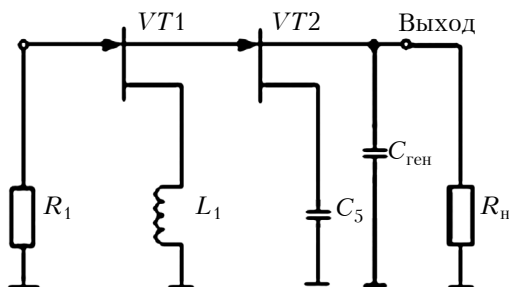


Рис. 1. Структурная (а) и высокочастотная (б) схемы двухкаскадного ОПИ и реализованный на его основе трехпараметрический генераторный датчик (в)

основе полевых транзисторов (ПТ), что обеспечивает технологичность, низкую стоимость и широкий диапазон рабочих частот синтезированного датчика.

После обоснования первичных требований к ПИП и каскадам ОПИ необходимо определить схему включения ПТ в каждом каскаде, а также характер импеданса каждого ПИП, при которых выполняются условия (2) и (3). С этой целью методом синтеза таблиц преобразования иммитанса [10] разработана таблица преобразования иммитанса однокаскадного двухпараметрического ОПИ на основе ПТ. Из нее следует, что для выполнения условий (2) и (3) второй каскад должен быть образован схемой включения ПТ с общим стоком (см. рис. 1, б), импеданс $Z_{Г3}$ должен иметь емкостной характер ($\text{Im}(Z_{Г3}) > 0$), а адмиттанс $Y_{ВЫХ}^{(1)}$ — индуктивный ($\text{Im}(Y_{ВЫХ}^{(1)}) < 0$).

Используя таблицу повторно, находим, что для получения $\text{Im}(Y_{ВЫХ}^{(1)}) < 0$ первый каскад ОПИ должен быть реализован на ПТ, включенным по схеме с общим стоком, причем в цепи затвора должен быть подключен активный импеданс ($\text{Re}(Z_{Г1}) > 0$, $\text{Im}(Z_{Г1}) = 0$), а в цепи стока — индуктивный импеданс ($\text{Im}(Z_{Г2}) < 0$).

Для обеспечения генерации сигнала, с учетом индуктивного характера преобразованного адмиттанса ($\text{Im}(Y_{ВЫХ}^{(2)}) < 0$), к выходу ОПИ подключена резонирующая емкость $C_{Ген}$, которая обеспечивает баланс фаз: $\text{Im}(Y_{ВЫХ}^{(2)}) + \omega C = 0$. Необходимый баланс амплитуд достигается выбором величины импеданса нагрузки R_H , исходя из условия $R_H < |1 / \text{Re}(Y_{ВЫХ}^{(2)})|$.

Таблица преобразования иммитанса однокаскадного двухпараметрического ОПИ на основе ПТ с общим стоком

Z_1	Z_2	$Y_{ВЫХ}$	Z_1	Z_2	$Y_{ВЫХ}$	Z_1	Z_2	$Y_{ВЫХ}$
R	R		L	R		C	R	
	L			L			L	
	C			C			C	

С учетом проведенного анализа получена высокочастотная схема трехпараметрического генераторного датчика, представленная на рис. 1, в.

Разработка математической модели

Исходя из назначения датчика, найдем его функцию преобразования в виде зависимости частоты генерации $f_{\text{ген}}$ от преобразуемых импедансов ОПИ ($Z_{Г1} \dots Z_{Г3}$), которые отвечают импедансам резистивного ($Z_{Г1}$), индуктивного ($Z_{Г2}$) и емкостного ($Z_{Г3}$) ПИП.

Преобразованный адмиттанс двухкаскадного ОПИ определяется выражением [11]

$$Y_{\text{вых2}} = Y_{22}^{(2)} - \frac{Y_{12}^{(2)} Y_{21}^{(2)}}{Y_{11}^{(2)} + Y_{\text{вых1}}}, \quad (4)$$

где

$$Y_{\text{вых1}} = Y_{22}^{(1)} - \frac{Y_{12}^{(1)} Y_{21}^{(1)}}{Y_{11}^{(1)} + 1/Z_{Г1}}, \quad (5)$$

$$[Y^{(1)}] = \begin{bmatrix} Y_{11}^{(1)} & Y_{12}^{(1)} \\ Y_{21}^{(1)} & Y_{22}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{11} + Z_{Г2} \Delta y}{1 + Z_{Г2} \Sigma y} & \frac{y_{12} - Z_{Г2} \Delta y}{1 + Z_{Г2} \Sigma y} \\ \frac{y_{21} - Z_{Г2} \Delta y}{1 + Z_{Г2} \Sigma y} & \frac{y_{22} + Z_{Г2} \Delta y}{1 + Z_{Г2} \Sigma y} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$[Y^{(2)}] = \begin{bmatrix} Y_{11}^{(2)} & Y_{12}^{(2)} \\ Y_{21}^{(2)} & Y_{22}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y'_{11} + Z_{Г3} \Delta y'}{1 + Z_{Г3} \Sigma y'} & \frac{y'_{12} - Z_{Г3} \Delta y'}{1 + Z_{Г3} \Sigma y'} \\ \frac{y'_{21} - Z_{Г3} \Delta y'}{1 + Z_{Г3} \Sigma y'} & \frac{y'_{22} + Z_{Г3} \Delta y'}{1 + Z_{Г3} \Sigma y'} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\Sigma y = y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22};$$

$$\Delta y = y_{11} y_{22} - y_{21} y_{12};$$

$y_{11}, y_{12}, y_{21}, y_{22}$ — параметры адмиттансной матрицы первого каскада ОПИ;

$$\Sigma y' = y'_{11} + y'_{12} + y'_{21} + y'_{22};$$

$$\Delta y' = y'_{11} y'_{22} - y'_{21} y'_{12};$$

$y'_{11}, y'_{12}, y'_{21}, y'_{22}$ — параметры адмиттансной матрицы второго каскада ОПИ.

После подстановки (5) в (4), с учетом (6) и (7), при условии что $Z_{Г1} = R_1$, $Z_{Г2} = j\omega L_1$ и $Z_{Г3} = 1/(j\omega C_5)$, получено аналитическое выражение для преобразованного адмиттанса двухкаскадного ОПИ

$$Y_{\text{вых2}} = \frac{y'_{22} + Z_{Г3} \cdot \Delta y'}{Z_{Г3} \cdot \Sigma y' + 1} - \frac{(y'_{12} - Z_{Г3} \cdot \Delta y')(y'_{21} - Z_{Г3} \cdot \Delta y')}{(Z_{Г3} \cdot \Sigma y' + 1)^2 (A + B - B)}, \quad (8)$$

где

$$A = \frac{y'_{11} + Z_{Г3} \cdot \Delta y'}{Z_{Г3} \cdot \Sigma y' + 1};$$

$$B = \frac{y_{22} + Z_{Г2} \cdot \Delta y}{Z_{Г2} \cdot \Sigma y + 1};$$

$$B = \frac{(y_{12} - Z_{Г2} \cdot \Delta y)(y_{21} - Z_{Г2} \cdot \Delta y)}{(Z_{Г2} \cdot \Sigma y + 1)^2 \left(\frac{y_{11} + Z_{Г2} \cdot \Delta y}{Z_{Г2} \cdot \Sigma y + 1} + \frac{1}{Z_{Г1}} \right)}.$$

С учетом подключения к выходу схемы резонирующей емкости $C_{\text{ген}}$ получим выражение для функции преобразования синтезированного датчика

$$f_{\text{ген}} = \frac{\text{Im}(Y_{\text{вых}})}{2\pi C_{\text{ген}}}, \quad (9)$$

при этом

$$\text{Im}(Y_{\text{вых}}) = \text{Im}(Y_{22}^{(2)}) + \frac{m_1 \sigma_r - m_2}{(1 + \sigma_r^2) \cdot \text{Re}(Y_{11}^{(2)} + Y_{\text{вых1}})},$$

$$\text{где } m_1 = \text{Re}(Y_{12}^{(2)} Y_{21}^{(2)});$$

$$m_2 = \text{Im}(Y_{12}^{(2)} Y_{21}^{(2)});$$

$$\sigma_r = \text{Im}(Y_{11}^{(2)} + Y_{\text{вых1}}) / \text{Re}(Y_{11}^{(2)} + Y_{\text{вых1}}).$$

Система уравнений (4)–(9) является математической моделью трехпараметрического генераторного датчика на базе двухкаскадного обобщенного преобразователя иммитанса, реализованного на основе полевых транзисторов, и описывает взаимосвязь параметров датчика с параметрами ОПИ и ПИП.

Результаты исследования

Синтезированная схема трехпараметрического радиочастотного датчика должна генерировать информационный сигнал с частотой, которая зависит от изменения параметра только одного из ПИП, причем диапазоны частоты генерации при «срабатывании» каждого из датчиков должны быть разными. Это достигается выбором рабочего диапазона частот и параметров ПИП.

В процессе численного эксперимента определены частоты, при которых активная составляющая выходного адмиттанса $Y_{\text{вых2}}$ ОПИ будет иметь максимальное отрицательное значение, что обеспечивает достижение максимальной мощности генерируемого сигнала. При использовании транзисторов VT1 типа NE4210S01 с граничной частотой $f_{T1} = 12$ ГГц и VT2 типа BF513 с граничной частотой $f_{T2} = 6$ ГГц максимальное отрицательное значение реальной составляющей выходного адмиттанса наблюдается на частоте 175 МГц (рис. 2). Данная частота использовалась в даль-

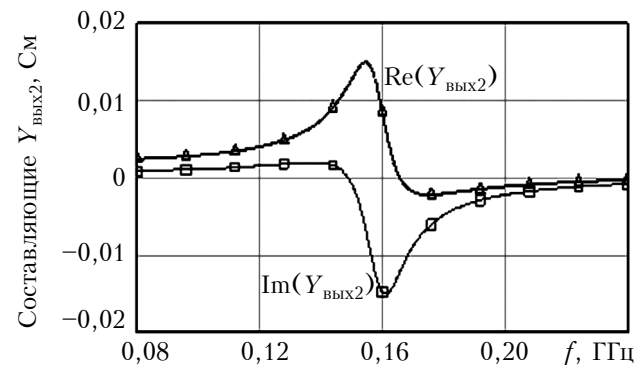


Рис. 2. Зависимость составляющих выходного адмиттанса двухкаскадного ОПИ от рабочей частоты f

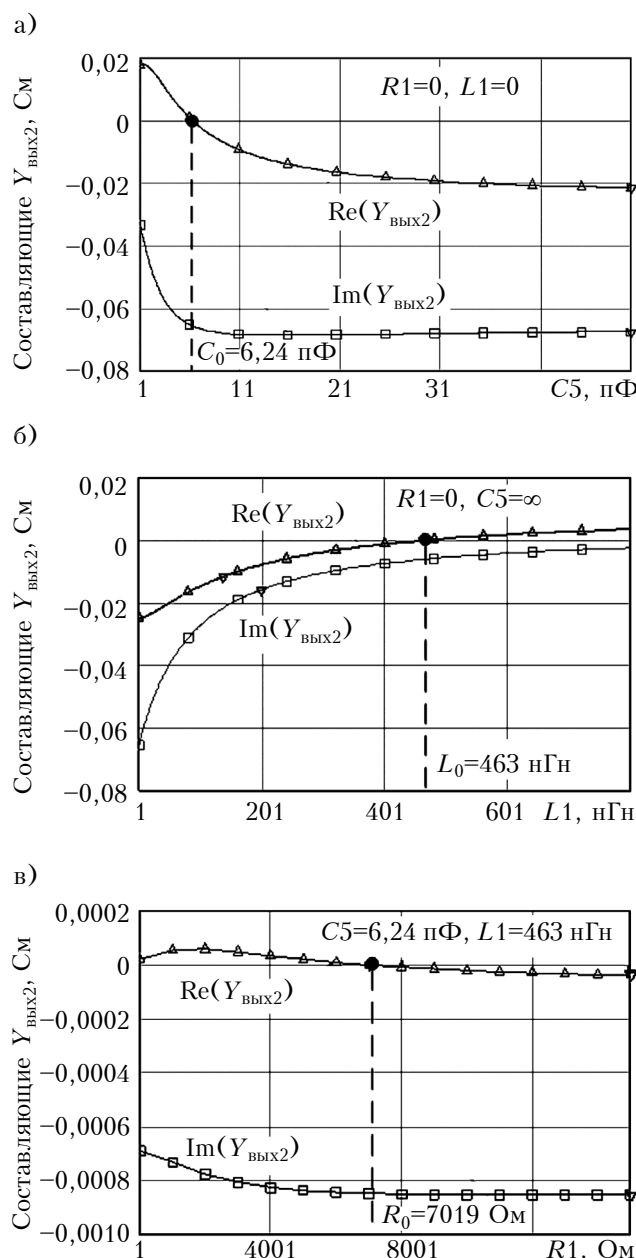


Рис. 3. Зависимость составляющих выходного адмиттанса датчика от изменения значений иммитансов емкостного (а), индуктивного (б) и резистивного (в) ПИП

нейших исследованиях в качестве центральной рабочей частоты трехпараметрического генераторного датчика.

Далее были проведены расчеты изменения выходного адмиттанса ОПИ в зависимости от параметров индуктивного ($L1$), емкостного ($C5$) и резистивного ($R1$) ПИП (рис. 3).

Полученные графики позволяют установить условия начала генерации сигнала и ее срыва при срабатывании одного из ПИП. В случае когда $R1=0$ Ом, $L1=0$ нГн генерация происходит после достижения емкостью третьего ПИП значения 6,24 пФ, т. е. значение $C5=6,24$ пФ является точкой начала генерации (рис. 3, а).

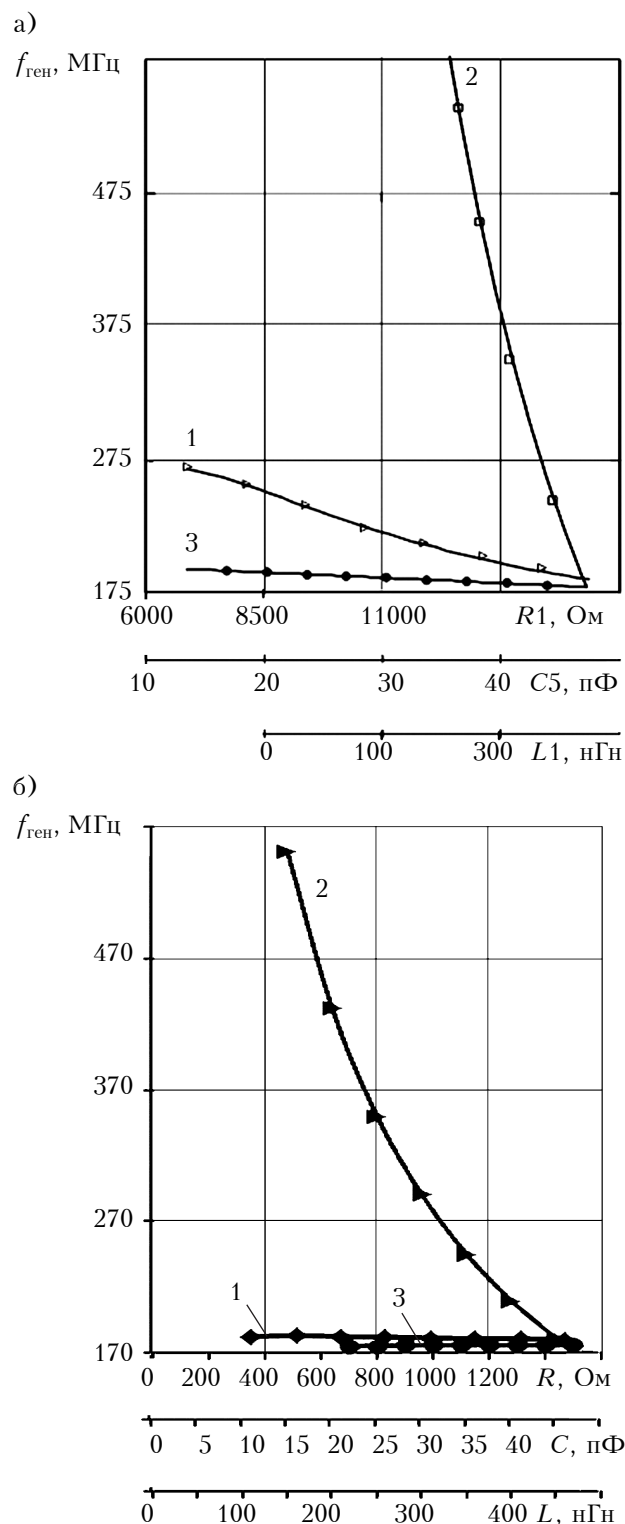


Рис. 4. Расчетные (а) и экспериментальные (б) зависимости частоты генерации от изменения параметров емкостного (1), индуктивного (2) и резистивного (3) ПИП

При $R1=0$ Ом, $C5=1000$ пФ такой точкой будет $L1=463$ нГн (рис. 3, б). Диапазон изменения значений сопротивления резистивного ПИП $R1$ выше 7 кОм является областью генерации сиг-

нала трехпараметрическим датчиком: в точке $R1=7019 \text{ Ом}$ происходит начало генерации сигнала (рис. 3, в).

Полученные результаты позволили провести моделирование зависимости частоты генерации $f_{\text{ген}}$ электромагнитных колебаний от параметров резистивного, индуктивного и емкостного ПИП и установить, что в каждом из этих случаев частота уменьшается при увеличении характерного параметра (рис. 4, а). Анализ результатов также показал, что частота генерируемых датчиком сигналов при уменьшении емкости $C5$ ($f_{\text{ген1}}$) лежит в области значений выше $180,1 \text{ МГц}$, при уменьшении индуктивности $L1$ ($f_{\text{ген2}}$) — выше $181,5 \text{ МГц}$, при уменьшении сопротивления $R1$ ($f_{\text{ген3}}$) — выше $174,9 \text{ МГц}$.

Сравнение результатов моделирования с полученными экспериментальными данными (см. рис. 4, б) показало, что расхождение не превышает 2%. Эксперимент проводился с использованием разработанного трехпараметрического датчика, принципиальная схема которого представлена на рис. 5.

При возбуждении схемы и генерации сигнала электромагнитные колебания поступают на выход датчика с тремя полосно-пропускающими фильтрами — ППФ1, ППФ2 и ППФ3, которые пропускают сигналы с частотой генерации, зависящей от изменения иммитансов емкостного, индуктивного или резистивного ПИП соответственно (рис. 4, а). Фильтр ППФ1 отфильтровывает сигнал частотой $f_{\text{ген1}}$, который возникает вследствие

изменения емкости $C5$ емкостного ПИП при наличии электрического поля и изменении его напряженности ($f_{\text{ген1}}=180 \text{ МГц}$). Фильтр ППФ2 отфильтровывает сигнал частотой $f_{\text{ген2}}$, возникающий вследствие изменения индуктивности $L1$ при наличии магнитного поля и изменении его напряженности ($f_{\text{ген2}}=181,5 \text{ МГц}$). Фильтр ППФ3 отфильтровывает сигнал с частотой $f_{\text{ген3}}$, который возникает вследствие изменения сопротивления $R1$ резистивного ПИП при изменении температуры ($f_{\text{ген3}}=174,9 \text{ МГц}$). Такая система позволяет определить, какой именно параметр изменяется и в каком диапазоне. В случае одновременного возмущающего влияния более чем на один ПИП частота генерируемого сигнала находится в диапазоне, отличном от полосы пропускания фильтров ППФ1...ППФ3, что исключает появление ложной информации.

Учитывая, что относительная чувствительность датчика определяется соотношением [12]

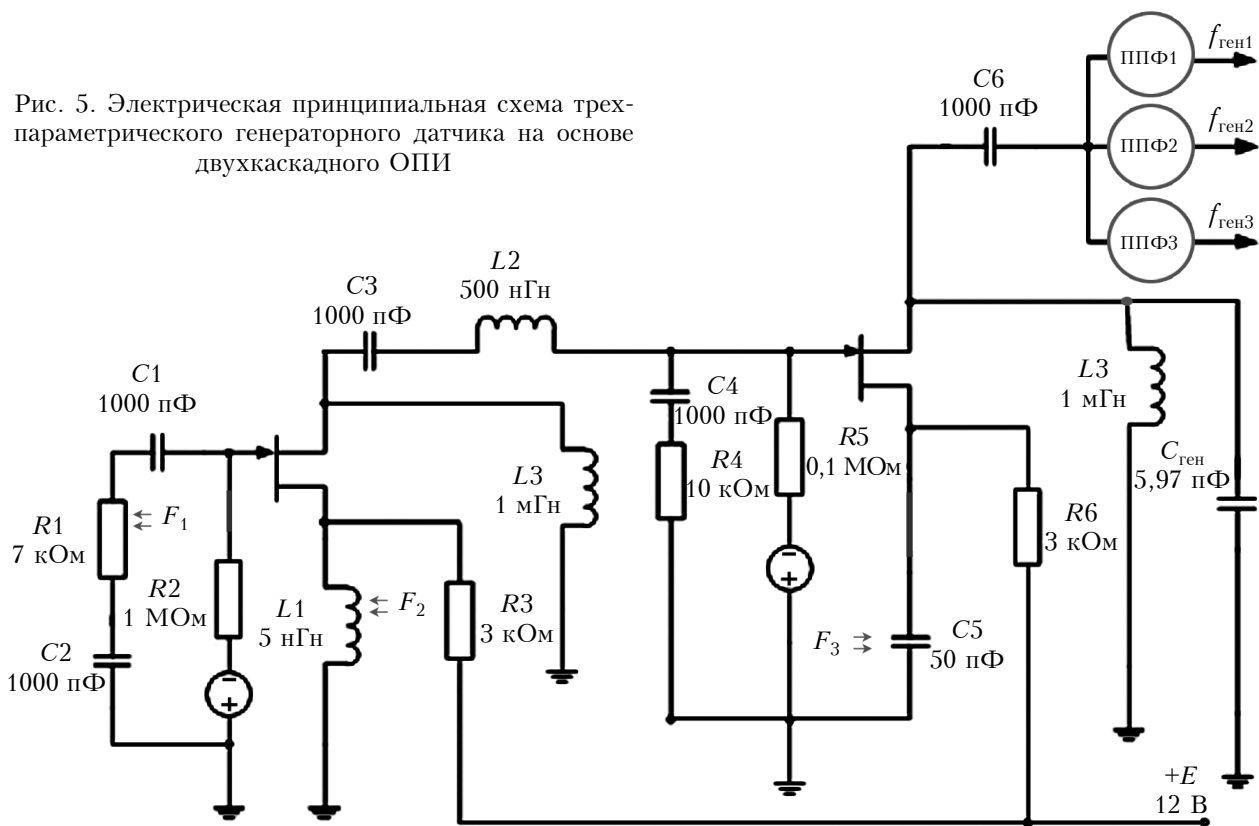
$$S_F^f = \frac{\partial f}{f} / \frac{\partial F}{F}, \quad (10)$$

где F — измеряемый параметр, а относительная чувствительность первичного измерительного преобразователя равна

$$S_F^Z = \frac{\partial Z}{Z} / \frac{\partial F}{F}, \quad (11)$$

где Z — резистивное, индуктивное или емкостное сопротивление ПИП, находим коэффициент увеличения относительной чувствительности генераторного датчика, использующего ОПИ,

Рис. 5. Электрическая принципиальная схема трехпараметрического генераторного датчика на основе двухкаскадного ОПИ



по сравнению с относительной чувствительностью ПИП:

$$K_S = S_F^f / S_F^Z = \frac{\partial f}{f} / \frac{\partial Z}{Z}. \quad (12)$$

Проведенные исследования разработанного трехпараметрического датчика с использованием уравнений (10)–(12) показали, что для резистивного канала относительная чувствительность $S_R^f = 1,88$, максимальный коэффициент увеличения чувствительности $K_S^R = 2$; для емкостного канала $S_C^f = -1,54$, $K_S^C = 1,5$; для индуктивного канала $S_L^f = -11,5$, $K_S^L = 1,2$. То есть, становится возможным повышение чувствительности датчика по сравнению с чувствительностью ПИП в 1,2–2 раза, а благодаря использованию двух каскадов ОПИ обеспечивается многофункциональность датчика. Потребляемая мощность датчика не превышает 100 мВт, а габаритные размеры 24×12 мм.

Выводы

Проведенные исследования подтвердили возможность разработки трехпараметрического генераторного датчика, который при своей многофункциональности и высокой чувствительности не усложняет конструкции, что достигается за счет использования двух каскадов ОПИ. Использование только двух полевых транзисторов и отсутствие коммутаторов делает его экономичным и обеспечивает возможность миниатюризации.

Генерация выходного сигнала предложенным датчиком происходит в различных диапазонах частоты, которые зависят от изменения значений параметров каждого из первичных измерительных преобразователей, что исключает неоднозначность результатов измерения. Использование полосно-пропускающих фильтров исключает появление ложной информации на выходе датчика и дает возможность определить, какой именно параметр изменяется и в каких пределах.

Таким образом, разработан мультифункциональный радиочастотный датчик, имеющий низ-

кое энергопотребление, простую конструкцию и малые размеры. При этом решена проблема неоднозначности выходного сигнала при измерении параметров ПИП, что является преимуществом по сравнению с другими существующими многоканальными системами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками. — Москва: Энергия, 1970.
2. Пат. 50131 України. Генераторний сенсор / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, М. А. Філінюк. — 2010. — Бюл. №10.
3. Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Годинюк І. М., Марусенкова Т. А., Ільканич В. Ю. Мультифункціональний сенсор на інтегральний магнітотранзисторний структурі // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2012. — № 1. — С. 110–120.
4. Sample A.P., Yeager D. J., Powledge P. S., Mamishev A. V., Smith J. R. Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2008. — Vol. 57, N 11. — P. 2608–2615.
5. Кравченко А. М., Анохин А. М. Двухканальный терморегулятор на основе S-негатронов // Датчики и системы. — 2013. — № 2. — С. 28–32.
6. Пат. 57679 України. Резистивний генераторний датчик / Л. Б. Ліщинська, Я. С. Рожкова, М. В. Барабан, С. Є. Фурса, М. А. Філінюк. — 2010. — Бюл. № 5.
7. Ліщинська Л. Б., Рожкова Я. С., Філінюк М. А. Індуктивно-резистивний генераторний датчик // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2012. — № 2. — С. 12–19.
8. Дубовой Н. Д. Автоматические многофункциональные измерительные преобразователи. — Москва: Радио и связь, 1989.
9. Ліщинська Л. Б. Багатопараметричні узагальнені перетворювачі імітансу на основі однокристальних напівпровідникових структур. — Вінниця: ВНТУ, 2012.
10. Ліщинська Л. Б., Філінюк М. А. Методика синтезу таблиць перетворення імітансу багатопараметричних УПН // Наукові праці ВНТУ. — 2011. — №1. — С. 1–7.
11. Богачев В. М., Никифоров В. В. Транзисторные усилители мощности. — Москва: Энергия, 1978.
12. Датчики : Справочник / З. Ю. Готра, Л. Я. Ильницький, Е. С. Полищук и др. — Львов: Каменяр, 1995. — 312 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 04.06 2014 г.

М. А. ФІЛІНЮК, Л. Б. ЛІЩИНСЬКА, О. О. ЛАЗАРЄВ, Я. С. ТКАЧУК

Україна, Вінницький національний технічний університет
E-mail: rozhkova.yana@gmail.com

ТРИПАРАМЕТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОРНИЙ ДАТЧИК

У роботі розглядається можливість побудови трипараметричного радіочастотного датчика. Розроблено математичну модель датчика, яка описує взаємозв'язок параметрів датчика з параметрами первинних вимірювальних перетворювачів. Досліджено основні залежності параметрів датчика, його функція перетворення і чутливість. Результати досліджень і адекватність математичної моделі перевірено експериментальним шляхом.

Ключові слова: радіочастотний датчик, узагальнений перетворювач імітансу, польовий транзистор.

GENERATING THREE-PARAMETER SENSOR

Generating sensors provide the possibility of getting remote information and its easy conversion into digital form. Typically, these are one-parameter sensors formed by combination of a primary transmitter (PT) and a sine wave generator. Two-parameter sensors are not widely used as their implementation causes a problem with ambiguity output when measuring the PT. Nevertheless, the problem of creating miniature, thrifty multi-parameter RF sensors for different branches of science and industry remains relevant.

Considering ways of designing RF sensors, we study the possibility of constructing a three-parameter microwave radio frequency range sensor, which is based on a two-stage three-parameter generalized imittance convertor (GIC). Resistive, inductive and capacitive PT are used as sensing elements. A mathematical model of the sensor, which describes the relation of the sensor parameters to the parameters of GIC and PT was developed. The basic parameters of the sensor, its transfer function and sensitivity were studied. It is shown that the maximum value of the power generated signal will be observed at a frequency of 175 MHz, and the frequency ranges depending on the parameters of the PT will be different. Research results and adequacy of the mathematical model were verified by the experiment. Error of the calculated dependences of the lasing frequency on PT parameters change, compared with the experimental data does not exceed 2 %. The relative sensitivity of the sensor based on two-stage GIC showed that for the resistive channel it is about 1.88, for the capacitive channel –1,54 and for the inductive channel –11,5. Thus, it becomes possible to increase the sensor sensitivity compared with the sensitivity of the PT almost 1,2–2 times, and by using the two stage GIC a multifunctional sensor is provided.

Keywords: radiofrequency sensor, generalized imittance convertor, field-effect transistor.

REFERENCES

1. Novitskii P. V. [Digital devices with frequency sensors]. Moscow, Energy, 1970, 424 p. (in Russian)
2. Patent 50131 UA. Generator sensor. L. B. Lishchinska, M. V. Baraban, M. A. Filinyuk, 2010.
3. Gotra Z. Yu., Golyaka R. L., Godynyuk I. M., Marusenkov T. A., Il'kanych V. Yu. [Multifunctional sensor based on integral magnetic transistor structure]. *Optoelectronic Information-Power Technologies*, 2012, no 1, pp. 110-120. (in Ukrainian)
4. Alanson P. Sample, Daniel J. Yeager, Pauline S. Powledge, Alexander V. Mamishev, Joshua R. Smith. Design of an RFID-Based Battery-Free Programmable Sensing Platform. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, vol. 57, no 11, pp. 2608-2615.
5. Kravchenko A.M., Anokhin A.M. [Dual thermostat on the basis of S-negatrons]. *Datchiki & Systemi (Sensors & Systems)*, 2013, no 2, pp. 28-32. (in Russian)
6. Patent 57679 UA. Resistive sensor generator. L. B. Lishchinska, Ya. S. Rozhkova, M. V. Baraban, S. Ye. Fursa, M. A. Filinyuk. 2010.
7. Lishchinska L. B., Rozhkova Y. S., Filinyuk M. A. [Inductively-resistive generating sensor]. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2012, no 2, pp. 12-19. (in Ukrainian)
8. Dubovoi N. D. [Automatic multifunctional transducers]. Moscow, Radio and sviaz', 1989, 256 p. (in Russian)
9. Lishchinska L. B. [Multi-parameter generalized imittance converters based on semiconductor structure chip]. Vinnitsia, VNTU, 2012, 243 p. (in Ukrainian)
10. Lishchinska L. B., Filinyuk M. A. [Table synthesis technique of imittance transducing of multi-parameter GICN]. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2011, no 1, pp. 1-7. (in Ukrainian)
11. Bogachev V. M., Nikiforov V. V. [Transistor amplifiers]. Moscow, Energy, 1978, 344 p.
12. Gotra Z. Yu., Il'nitskii L. Ya., Polishchuk E. S. et al. [Sensors: Handbook]. Lviv, Kamenyar, 1995, 312 p.

Д. ф.-м. н. Л. И. АНАТЫЧУК^{1,2}, к. ф.-м. н. Р. Р. КОБЫЛЯНСКИЙ^{1,2},
к. ф.-м. н. И. А. КОНСТАНТИНОВИЧ^{1,2}

Украина, г. Черновцы, ¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,

²Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: romakobylianskyi@ukr.net

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО МЕДИЦИНСКОГО ТЕРМОМЕТРА

В работе приведены результаты расчетов термоэлектрического преобразователя для питания электронного медицинского термометра, определена рациональная конструкция такого преобразователя. Показана целесообразность использования термоэлектрического преобразователя в разных режимах его работы для питания электронного термометра.

Ключевые слова: термоэлектрический преобразователь, термоэлектрический источник питания, электронный медицинский термометр.

В настоящее время для питания маломощной электронной аппаратуры используются химические источники. Несмотря на непрерывное улучшение их качества, они все же имеют принципиальные недостатки: относительно высокие удельные массогабаритные характеристики, наличие саморазряда, малый ресурс работы, ограниченный срок хранения и эксплуатации при низких температурах. Кроме того, производство химических источников электричества — энергоемкое, дорогое и вредное для окружающей среды.

Все это обуславливает необходимость поиска новых источников электрической энергии, лишенных указанных недостатков. Особенно перспективными в этом отношении являются термоэлектрические источники питания [1–3], поскольку в целом термоэлектрические генераторы имеют большой ресурс работы (20–30 лет и более), они надежны при использовании в экстремальных условиях и не требуют частой замены.

Известно, что термоэлектрические микрогенераторы используются для питания маломощных электронных устройств, систем телеметрии, навигации, ИК-детекторов, а также для питания военной и медицинской техники [4–8]. Однако, несмотря на разнообразное использование термоэлектрических источников питания в медицинской аппаратуре, отсутствуют данные об их применении в электронных медицинских термометрах (ЭМТ). Замена химических элементов питания на термоэлектрические в таких термометрах решила бы проблему утилизации отработанных химических источников питания, улучшив тем самым экологическое состояние окружающей среды. Именно поэтому в Институте термоэлектричества НАН и МОН Украины активно проводятся работы по созданию термоэлектрических преобразователей для питания ЭМТ [9–12].

Эффективность термоэлектрического преобразователя зависит от согласования его сопротивления, которое определяется его конструкцией, и сопротивления нагрузки. В настоящей работе решалась задача определения такой конструкции термоэлектрического (ТЭ) источника питания ЭМТ, которая обеспечивала бы необходимые электрические параметры, а количество ТЭ-материала, необходимого для его изготовления, было бы минимальным.

Из технических характеристик ЭМТ известно, что для его электрического питания необходимо постоянное напряжение $U = 1,5$ В. В результате измерений было установлено, что при таком напряжении максимальный ток составляет $I_{\max} = 36$ мкА, т. е. максимальная потребляемая мощность $W_{\max} = 54$ мкВт. Таким образом, разрабатываемый источник питания должен обеспечивать указанные электрические параметры.

Для решения поставленной задачи построим физическую модель ТЭ-источника питания и проведем оценку его параметров для разных режимов работы — максимальной мощности и несогласованной нагрузки.

Модель термоэлектрического источника питания

Физическая модель термоэлектрического источника питания ЭМТ представлена на **рис. 1**. Тепловой поток Q_1 от тела человека через радиатор 1 частично передается термоэлектрическому преобразователю 2 (Q_2), частично рассеивается в окружающую среду (Q_3), а тепловой поток Q_4 от холодной грани преобразователя через радиатор 3 отводится в окружающую среду. Таким образом создается необходимый для работы преобразователя перепад между температурами его граней. Стабилизатор напряжения 4 обеспечивает напряжение на уровне

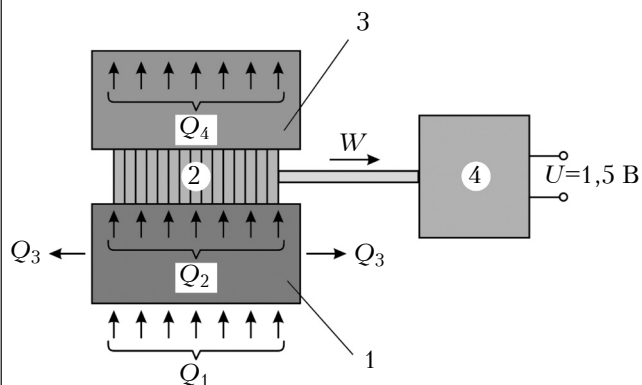


Рис. 1. Модель термоэлектрического источника питания для ЭМТ:

1, 3 — радиаторы; 2 — термоэлектрический преобразователь; 4 — стабилизатор напряжения

1,5 В. Такой источник может в полной мере заменить обычный химический гальванический элемент питания ЭМТ.

Режим максимальной мощности

Рассмотрим режим согласованной нагрузки, т. е. режим максимальной электрической мощности источника питания. В таком режиме при напряжении $U = 1,5$ В термо-ЭДС должна составлять $\varepsilon = 3$ В.

Экспериментальные исследования показывают, что при перепаде между температурой тела человека и окружающей среды $10–15^\circ\text{C}$ между гранями ТЭ-преобразователя устанавливается перепад $\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$.

При значении коэффициента Зеебека $\alpha = 200$ мкВ/К и $\varepsilon = 3$ В необходимое количество ветвей N ТЭ-преобразователя составляет 3000.

В режиме согласованной нагрузки сопротивление ТЭ-преобразователя r равно сопротивлению нагрузки (т. е. ЭМТ) R при максимальном значении тока $I_{\max}$. Проведя несложные математические расчеты, получим, что при $I_{\max} = 36$ мкА $R = 41,7$ кОм. Отсюда следует, что при высоте ветви $l = 5$ мм площадь ее поперечного сечения равна $S = 36 \cdot 10^{-4}$ мм².

Таким образом, геометрические размеры ТЭ-преобразователя, при которых достигается его максимальная эффективность при работе в режиме согласованной нагрузки, могут быть следующими: количество ветвей $N = 3000$ шт., их высота $l = 5$ мм, размеры поперечного сечения одной ветви $0,06 \times 0,06$ мм, ширина изоляционных промежутков между ветвями $b = 0,02$ мм, типичные размеры теплопереходов составляют $0,2–0,5$ мм, общие габаритные размеры преобразователя $4,4 \times 4,4 \times 5$ мм.

Указанные размеры преобразователя сопоставимы с размерами традиционного химического гальванического источника питания ЭМТ.

Следует отметить, что типичные линейные размеры a сечения ветвей термоэлектрической

микробатареи составляют $0,2–0,5$ мм, и изготовить ветви малого сечения, указанного выше, довольно сложно технологически. Использование же ветвей больших размеров приведет к существенному рассогласованию сопротивлений источника питания и нагрузки, а это, в свою очередь, приведет к значительному снижению КПД преобразования энергии. Для того чтобы определить рациональные с точки зрения КПД и технологичности изготовления размеры генератора, следует рассмотреть режим несогласованной нагрузки.

Режим несогласованной нагрузки

Максимальный КПД термоэлектрического преобразователя определяется согласно выражению [1]

$$\eta = \frac{1}{4} \frac{T_1 - T_2}{T_1} Z \frac{T_1 + T_2}{2}, \quad (1)$$

где Z — термоэлектрическая добротность материала преобразователя;

T_1, T_2 — значения температуры на гранях термоэлектрического преобразователя.

Расчеты показывают, что при $\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$ КПД преобразователя находится в пределах $0,3–0,4\%$ в зависимости от добротности термоэлектрического материала ветвей преобразователя.

Рассмотрим зависимость КПД от линейных размеров его ветвей, для чего воспользуемся упрощенными соотношениями (без учета тепла Джоуля и Пельтье в ветвях термоэлектрического преобразователя) и таким образом оценим снижение КПД:

$$\eta = \frac{W}{Q_h}, \quad (2)$$

$$Q_h = \kappa \frac{S}{l} \Delta T N, \quad (3)$$

где Q_h — тепловая мощность, которую воспринимает термоэлектрический преобразователь;

κ — коэффициент теплопроводности материала преобразователя.

Отсюда видно, что увеличение площади поперечного сечения ветвей преобразователя приводит к увеличению теплового потока Q_h и, соответственно, к снижению КПД преобразования тепловой энергии в электрическую.

Из рис. 2 видно, что при увеличении линейных размеров сечения ветвей от $0,06$ до $0,2–0,5$ мм КПД преобразователя уменьшается приблизительно в $5–10$ раз. Однако такое снижение КПД можно компенсировать увеличением теплового потока за счет увеличения площади поперечного сечения термоэлектрического преобразователя.

Рассмотрим как влияет увеличение линейных размеров ветвей на общие габариты преобразователя при условии сохранения исходных параметров — $U = 1,5$ В, $W = 54$ мкВт.

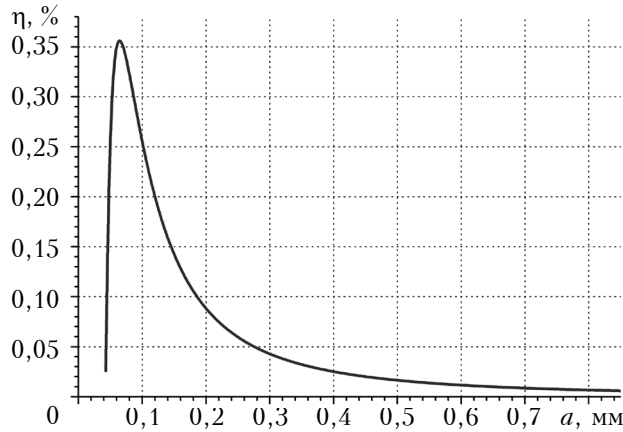


Рис. 2. Зависимость КПД ТЭ-преобразователя от линейных размеров сечения его ветвей

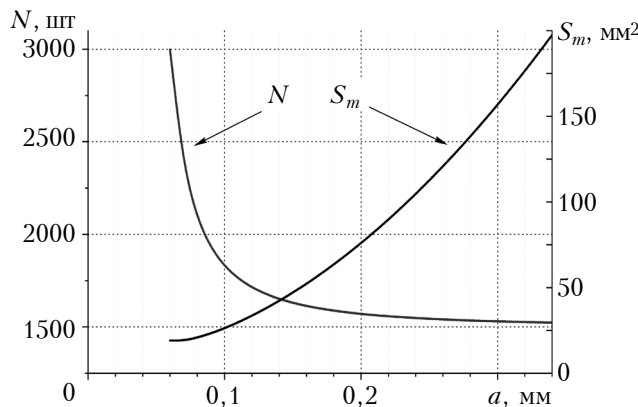


Рис. 3. Зависимость площади поперечного сечения ТЭ-преобразователя и количества ветвей от линейных размеров сечения его ветвей

Путем несложных преобразований выражения закона Ома для полной цепи с учетом соотношения для термо-ЭДС $\varepsilon = \alpha N \Delta T$ можно найти количество ветвей ТЭ-преобразователя, при котором будут обеспечены необходимые параметры питания ЭМТ (рис. 3):

$$N = \frac{RU}{R\alpha\Delta T - \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S} U}, \quad (4)$$

где σ — коэффициент электропроводности (произведение $\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{S}$ представляет собой сопротивление одной ветви термоэлектрического преобразователя).

С учетом (4) и изоляционных промежутков между ветвями $b = 0,02$ мм, площадь поперечного сечения ТЭ-преобразователя S_m определяется следующим выражением:

$$S_m = \frac{RU}{R\alpha\Delta T - \frac{1}{\sigma} \frac{l}{a^2} U} (a + b)^2. \quad (5)$$

Очевидно, что площадь S_m растет с увеличением поперечного сечения ветвей ТЭ-преобразователя.

При выборе размеров ветвей ТЭ-преобразователя, с одной стороны, необходимо учитывать то, что он предназначен для малогабаритной медицинской аппаратуры, а с другой — иметь в виду технологические сложности изготовления ветвей малых размеров, о которых говорилось выше. Сделать рациональный выбор можно с помощью рис. 3. Очевидно, таким решением в рассматриваемом случае будет использование ТЭ-преобразователя с размерами ветвей $a \approx 0,12$ мм ($S_m \approx 32$ мм²).

Таким образом, на основании проведенных расчетов установлено, что термоэлектрический преобразователь размерами $5,7 \times 5,7 \times 5$ мм обеспечивает необходимые для работы электронного термометра параметры ($U = 1,5$ В, $W = 54$ мкВт). Для этого случая также могут быть использованы два термоэлектрических преобразователя с размерами $4 \times 4 \times 5$ мм, которые в полной мере могут заменить обычный химический гальванический элемент питания в электронном медицинском термометре.

Проведенное исследование показало целесообразность использования ТЭ-преобразователя в разных режимах его работы для питания электронного медицинского термометра. Серийное производство предложенного термоэлектрического источника питания позволит снизить его стоимость до конкурентоспособного уровня. При этом, благодаря отсутствию необходимости в периодической замене источника питания, такие термометры будут иметь значительно более низкую стоимость обслуживания, что обуславливает экономическую целесообразность их производства. Дальнейшее их внедрение позволит отказаться от использования вредных химических гальванических источников питания и станет еще одним шагом на пути повышения безопасности и экологичности медицинского оборудования.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. — Киев: Наукова думка, 1979.
2. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. — Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003.
3. Струтинская Л.Т. Термоэлектрические микрогенераторы. Современное состояние и перспективы использования // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 4. — С. 5—13.
4. Pat. 6222114 USA. Portable wrist device // Mitamura Gen. — 2001.
5. Snyder G.J. Small thermoelectric generators // The Electrochemical Society Interface. — Fall, 2008. — P. 54—56.
6. Rowe D.M. Low powered thermoelectric generators and devices // Proc. of the 12th International Conference on Thermoelectrics. — Japan, Yokohama. — 1993. — P. 429—438.

7. Watkins C., Shen B., Venkatasubramanian R. Low-grade-heat energy harvesting using superlattice thermoelectrics for applications in implantable medical devices and sensors // Proc. of the 24th International Conference on Thermoelectrics. — USA, Clemson. — 2005. — P. 250–252.

8. Leonov V., Torfs T., Hoof C. V., Vullers R. J. M. Smart wireless sensors integrated in clothing: an electrocardiography system in a shirt powered using human body heat // Sensors & Transducers Journal. — Vol. 107, iss. 8. — 2009. — P. 165–176.

9. Заявка на кор. мод. № u201308794. Електронний медичний термометр з термоелектричним джерелом живлення // Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Романюк С.Б. — 15.07.2013.

10. Заявка на кор. мод. № u201312570. Електронний медичний термометр з термоелектричним джерелом живлення // Анатичук Л.І. — 28.10.2013.

11. Заявка на кор. мод. № u201315453. Електронний медичний термометр з термоелектричним джерелом живлення // Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р., Маник О.М. — 30.12.2013.

12. Анатичук Л.І., Кобилянський Р.Р. Про точність визначення температури електронним медичним термометром з термоелектричним джерелом живлення // Термоелектрика. — № 5. — 2013. — С. 75–79.

Дата поступления рукописи
в редакцию 21.01 2014 г.

Л. І. АНАТИЧУК^{1,2}, Р. Р. КОБИЛЯНСЬКИЙ^{1,2},
І. А. КОНСТАНТИНОВИЧ^{1,2}

Україна, м. Чернівці, ¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
E-mail: romakobylianskyi@ukr.net

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННОГО МЕДИЧНОГО ТЕРМОМЕТРА

У роботі наведено результати розрахунків термоелектричного перетворювача для живлення електронного медичного термометра, визначено раціональну конструкцію такого перетворювача. Показано доцільність використання термоелектричного перетворювача в різних режимах його роботи для живлення електронного термометра.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач, термоелектричне джерело живлення, електронний медичний термометр.

DOI: 10.15222/TKEA2014.4.28
UDC 537.32

L.I. ANATYCHUK^{1,2}, R.R. KOBLYANSKYI^{1,2},
I.A. KONSTANTINOVICH^{1,2}

Ukraine, Chernivtsi, ¹Institute of Thermoelectricity of NAS and MES of Ukraine,
²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
E-mail: romakobylianskyi@ukr.net

THERMOELECTRIC POWER SOURCE FOR ELECTRONIC MEDICAL THERMOMETER

At present chemical sources of electricity are used as power supplies for low-powered electronic equipment. Despite continuous quality improvement (CQI) of chemical sources of electricity they still have some critical faults, such as: relatively high specific overall dimensions, presence of self-discharge, short life and limited shelf life under low temperature storage. Moreover, the chemical source of electricity production is power-consuming, costly and environmentally harmful.

The plurality of facts given above stipulates the search for new sources of electric energy eliminating the faults chemical ones possess. Therefore, thermoelectric power supply sources are especially prospective in this respect as thermoelectric generators in general have a long operational life, they are reliable for use in extreme conditions and do not need being changed periodically.

It is a well-known fact that thermoelectric converter efficiency depends on the load resistance and the converter resistance matching, which are stipulated by such converter design. The results of calculations of a thermoelectric converter for a medical thermometer power supply are presented in this paper. The authors define a rational design of such a converter which is limited by technological complexity of small-size legs fabrication, on the one hand, and with the converter overall dimensions, on the other hand. The study carried out has shown the expediency of a thermoelectric converter application for various operational modes to

provide an electronic medical thermometer power supply, particularly in the unmatched load mode with the converter efficiency dropping down five to tenfold.

The work confirms the possibility of a thermoelectric converter of human body application for an electronic medical thermometer power supply.

Keywords: thermoelectric converters, thermoelectric source of electricity, electronic medical thermometer.

REFERENCES

1. Anatychuk L.I. *Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva* [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kiev, Naukova Dumka, 1979, 766 p.
2. Anatychuk L.I. *Termoelektrichestvo. T. 2. Termoelektricheskie preobrazovateli energii* [Thermoelectricity. Vol. 2. Thermoelectric power converters]. Kyiv, Chernivtsi, Institute of Thermoelectricity, 2003, 376 p.
3. Strutynskaya L.T. [Thermoelectric microgenerators. Current status and prospects of employment]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2008, no 4, pp. 5-13. (in Russian)
4. Pat. 6222114 USA. Portable Wrist Device. Mitamura Gen, 2001.
5. Snyder G.J. Small thermoelectric generators. *The Electrochemical Society Interface*. Fall, 2008, pp. 54-56.
6. Rowe D.M. Low powered thermoelectric generators and devices. *Proc. of the 12th International Conference on Thermoelectrics*, Japan, Yokohama, 1993, pp. 429-438.
7. Watkins C., Shen B., Venkatasubramanian R. Low-grade-heat energy harvesting using superlattice thermoelectrics for applications in implantable medical devices and sensors. *Proc. of the 24th International Conference on Thermoelectrics*, USA, Clemson, 2005, pp. 250-252.
8. Leonov V., Torfs T., Hoof C.V., Vullers R.J.M. Smart wireless sensors integrated in clothing: an electrocardiography system in a shirt powered using human body heat. *Sensors & Transducers Journal*, 2009, vol. 107, no 8, pp. 165-176.
9. Pat. 87400 UA. [Electronic medical thermometer with thermoelectric power supply]. L.I. Anatychuk, R.R. Kobylanskyi, S.B. Romanyuk, 2014.
10. Pat. 89035 UA. [Electronic medical thermometer with thermoelectric power supply]. L.I. Anatychuk, 2014.
11. Pat. u201315453 UA. [Electronic medical thermometer with thermoelectric power supply] L.I. Anatychuk, R.R. Kobylanskyi, O.M. Manyk, 2013.
12. Anatychuk L.I., Kobylanskyi R.R. On the accuracy of temperature measurement by electronic medical thermometer with thermoelectric power supply. *Journal of Thermoelectricity*, 2013, no 5, pp. 68-72.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Богущ 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, нашедших широкое применение 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. Ю. В. БОНДАРЕНКО¹, к. т. н. П. С. САФРОНОВ¹, к. т. н. А. Ф. БОНДАРЕНКО¹,
д. т. н. В. Н. СИДОРЦ², Т. С. РОГОЗИНА¹

Украина, г. Алчевск, ¹Донбасский государственный технический университет;
г. Киев, ²Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ГИБРИДНЫЕ ЭНЕРГОНАКОПИТЕЛИ НА ОСНОВЕ АККУМУЛЯТОРОВ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ

С помощью имитационного моделирования показана возможность применения в установках контактной микросварки гибридных энергонакопителей на основе аккумуляторных батарей и суперконденсаторов, которые обладают высокими энергетическими и динамическими характеристиками, достаточными для обеспечения формирования импульсов сварочного тока с необходимыми параметрами.

Ключевые слова: автономный источник питания, энергонакопитель, суперконденсатор, аккумуляторная батарея, контактная микросварка.

Контактная микросварка является эффективной технологией неразъемного соединения малогабаритных деталей, широко используемой в электронной промышленности и приборостроении. Для установок, реализующих контактную микросварку, характерны следующие особенности потребления электроэнергии во время технологического процесса: потребление значительной энергии короткими импульсами, длительность которых не превышает нескольких миллисекунд, нелинейный характер нагрузки, специальный закон изменения сварочного тока [1]. Все это негативно влияет на питающую сеть при использовании сварочных установок в промышленном масштабе [2] и вызывает необходимость применения специальных технических средств, таких как корректоры коэффициента мощности и фильтры электромагнитных помех. Чтобы минимизировать влияние сварочных установок на сеть можно также применять автономные источники питания. Их основой являются энергонакопительные элементы, способные обеспечивать бесперебойную работу сварочной установки в течение определенного времени (рабочей смены или др.). При этом потребление энергии во время периодического заряда таких автономных источников происходит достаточно равномерно, не оказывая негативного влияния на сеть. Использование автономных источников питания для установок контактной микросварки также делает возможным их использование в тех случаях, когда доступ к электросетям ограничен или отсутствует, например при работе в космосе или в открытом море.

Актуальной задачей при построении автономных источников питания для установок контактной микросварки является выбор эффективных энергонакопительных элементов, обладающих большой емкостью и малым внутренним сопро-

тивлением, способных накапливать и отдавать энергию с высокой скоростью и эффективно, а также сохранять свои характеристики при частых перезарядках.

На сегодняшний день довольно широкое применение в качестве энергонакопителей получили суперконденсаторы, известные также как ионисторы [3]. Они используются в электро-транспорте, бытовой электронике, энергетике. Суперконденсаторы обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими накопительными элементами, такими как, например, аккумуляторные батареи и электролитические конденсаторы. В частности, суперконденсаторы имеют лучшие массогабаритные показатели, чем электролитические конденсаторы той же емкости, и более высокую скорость заряда/разряда, чем аккумуляторы, к тому же они выдерживают сотни тысяч циклов перезаряда. Известны также гибридные решения, когда совместно используются аккумуляторные батареи и суперконденсаторы [4]. Следует, однако, отметить, что публикации, в которых рассматриваются вопросы применения таких гибридных энергонакопителей в установках контактной микросварки, отсутствуют.

Целью данной работы является исследование возможности применения гибридных энергонакопителей, включающих различные типы накопительных элементов, в автономных источниках питания для установок контактной микросварки. Ожидаемый эффект от такой комбинации — высокая энергоемкость накопителя и высокая скорость отдачи энергии в нагрузку.

Эквивалентная схема гибридного энергонакопителя

Обобщенная принципиальная схема источника питания, состоящего из гибридного энергона-

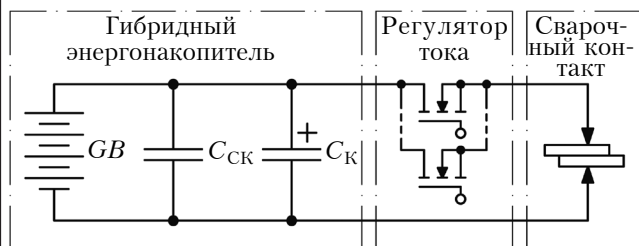


Рис. 1. Обобщенная принципиальная схема автономного источника питания

копителя и транзисторного регулятора тока, в упрощенном виде показана на **рис. 1**. Гибридный энергонакопитель включает аккумуляторную батарею GB , суперконденсатор $C_{СК}$ и электролитический конденсатор C_K . Транзисторный регулятор осуществляет формирование необходимого закона изменения сварочного тока в нагрузке [5]. Нагрузкой источника питания является сварочный контакт.

Для проведения теоретических исследований работы предлагаемого гибридного энергонакопителя в составе автономного источника питания для установки контактной микросварки необходимо составить его эквивалентную схему, которая с достаточной точностью будет отражать его электрические свойства. Рассмотрим известные эквивалентные схемы элементов, входящих в состав гибридного энергонакопителя.

Простейшая эквивалентная схема суперконденсатора представляется в виде RC -цепочки, как это показано на **рис. 2, а**, где $C_{СК}$ — электрическая емкость суперконденсатора, а $R_{СК}$ — его паразитное последовательное активное сопротивление [4].

Также известна эквивалентная схема суперконденсатора, показанная на **рис. 2, б** [6]. При ее составлении принята во внимание внутренняя пористость структуры электродов суперконденсатора: каждая пора представлена отдельным конденсатором, обладающим собственной малой емкостью и внутренним сопротивлением. Суперконденсатор в целом представлен параллельным соединением таких пор ($R_1C_1...R_nC_n$) и параллельно подключенным сопротивлением утечки ($R_{УТ}$).

На **рис. 2, в** представлена эквивалентная схема суперконденсатора, которая учитывает емкость двойного электрического слоя (C_1, C_2), сопротивление диэлектрика (R_1, R_2), сопротивления электродов ($R_{Э1}, R_{Э2}$) и сопротивление слоя сепаратора ($R_{СЕП}$) [7].

Еще один вариант эквивалентной схемы суперконденсатора представлен на **рис. 2, г** [8], где помимо ранее упомянутых параметров учтена эквивалентная последовательная паразитная индуктивность обкладок и выводов суперконденсатора ($L_{СК}$), влияние которой проявляется при работе в импульсных режимах.

Необходимо отметить, что эквивалентная схема на **рис. 2, а** является слишком упрощенной,

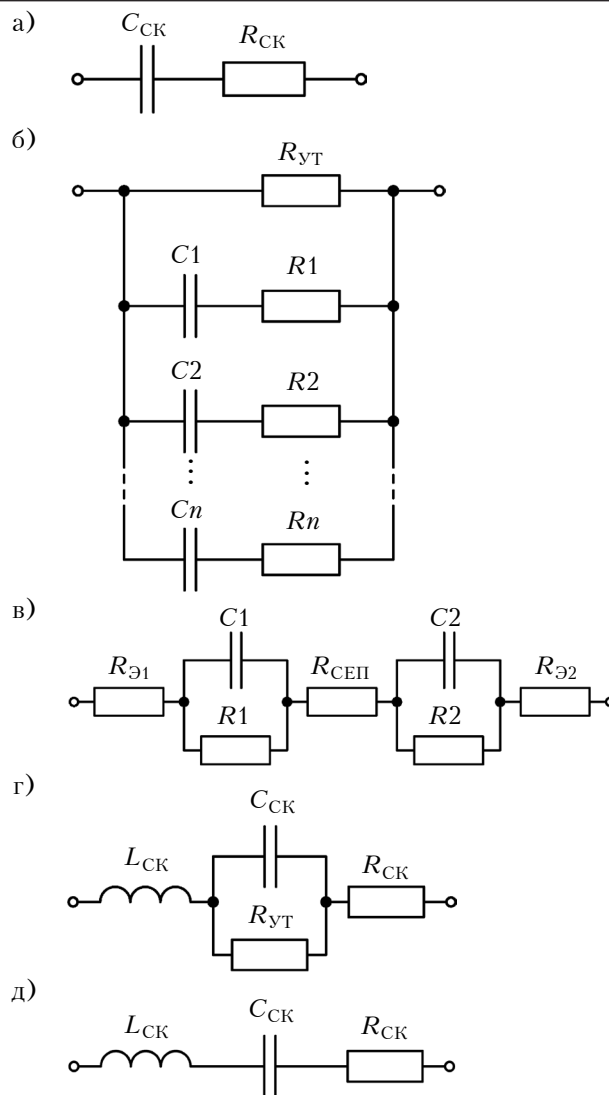


Рис. 2. Эквивалентные схемы суперконденсаторов

т. к. не отражает индуктивную составляющую суперконденсатора, которая важна при исследовании динамических процессов передачи энергии в нагрузку. Эквивалентные схемы на **рис. 2, б, в** довольно точно отражают особенности внутреннего строения суперконденсаторов и могут быть интересны при теоретических исследованиях протекающих в них процессов, однако использовать их при исследовании поведения суперконденсатора как компонента электрической схемы весьма затруднительно, поскольку определить реальные параметры входящих в их состав элементов невозможно. Наиболее подходящей для планируемых исследований представляется схема на **рис. 2, г**, которая отражает все необходимые составляющие, влияющие на динамику процесса передачи энергии. Данная схема может быть упрощена за счет исключения сопротивления утечки $R_{УТ}$, поскольку величина тока утечки суперконденсатора составляет доли миллиампера, а сварочного тока — сотни ампер. С учетом такого упрощения эквивалент-

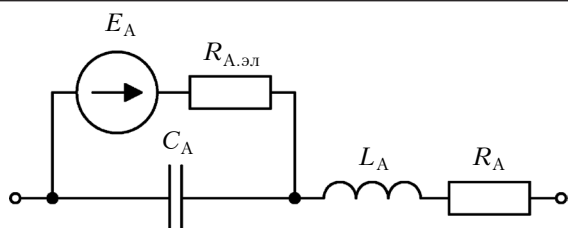


Рис. 3. Эквивалентная схема аккумуляторной батареи

ная схема суперконденсатора будет выглядеть так, как показано на рис. 2, д. Для представления электролитического конденсатора будем использовать аналогичную ей схему, позволяющую учесть емкость конденсатора, его паразитное последовательное активное сопротивление и паразитную индуктивность обкладок и выводов [9], которые, как правило, приводятся в технической документации.

Для представления аккумуляторной батареи воспользуемся эквивалентной схемой, приведенной на **рис. 3** [10], которая учитывает все основные электрические параметры батареи: E_A — ЭДС батареи; $R_{A.эл}$ — сопротивление, отражающее проводящие свойства электролита; C_A — эквивалентная емкость, обусловленная внутренней структурой батареи; R_A , L_A — сопротивление и индуктивность выводов батареи.

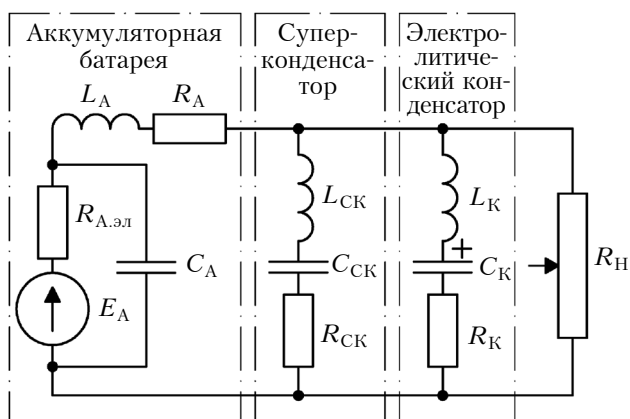


Рис. 4. Общая эквивалентная схема гибридного энергонакопителя

Общая эквивалентная схема гибридного энергонакопителя, которая далее будет использоваться для проведения исследований, показана на **рис. 4**. Транзисторный регулятор и сварочный контакт представлены здесь в виде переменного сопротивления R_H .

Характеристики гибридного энергонакопителя

Исследование характеристик гибридного энергонакопителя было проведено путем имитационного моделирования с использованием пакета MATLAB/Simulink. При этом были рассмотрены два варианта автономных источников энергии для микросварки — стационарный и

портативный, отличающиеся между собой величиной емкости аккумуляторных батарей. В первом случае был применен автомобильный аккумулятор большой емкости, во втором — набор миниатюрных аккумуляторов малой емкости.

Значения параметров блоков имитационной модели были заданы в соответствии с параметрами реальных компонентов, взятыми из [11, с. 15; 12, с. 119; 13, с. 1; 14, с. 23; 15; 16].

Для стационарного автономного источника энергии были выбраны автомобильный аккумулятор типа 6СТ-55 емкостью 55 А·ч, суперконденсаторы ВСАР0350Е270Т11 емкостью 350 Ф, электролитический конденсатор К50-77 емкостью 0,1 Ф. При моделировании были заданы следующие параметры эквивалентной схемы аккумулятора: $E_A=12$ В; $C_A=1,25$ Ф; $R_{A.эл}=83,3$ мОм; $R_A=7,7$ мОм; $L_A=0,2$ мГн. Параметры эквивалентной схемы батареи из пяти последовательно соединенных суперконденсаторов: $C_{СК}=70$ Ф; $R_{СК}=16$ мОм; $L_{СК}=0,3$ мкГн. (Последовательное соединение суперконденсаторов применено для их согласования по напряжению с аккумуляторной батареей, т. к. каждый из суперконденсаторов рассчитан на 2,7 В, а напряжение аккумулятора — 12 В.) Параметры эквивалентной схемы электролитического конденсатора: $C_K=0,1$ Ф; $R_K=15$ мОм; $L_K=0,1$ мкГн.

Для портативного автономного источника энергии были выбраны пять последовательно соединенных миниатюрных Ni-MH аккумуляторов GP130AАНЕ емкостью 1,3 А·ч и величиной ЭДС 1,2 В, три последовательно соединенных суперконденсатора ВСАР0350Е270Т11. При моделировании были заданы следующие параметры эквивалентной схемы аккумуляторной батареи: $E_A=6$ В; $C_A=0,125$ Ф; $R_{A.эл}=75$ мОм; $R_A=10$ мОм; $L_A=0,3$ мкГн. Параметры эквивалентной схемы батареи суперконденсаторов: $C_{СК}=116,7$ Ф; $R_{СК}=9,6$ мОм; $L_{СК}=0,18$ мкГн.

При моделировании был задан закон изменения сопротивления (R_H), приближенно отражающий реальное поведение сварочного контакта в процессе сварки [17], и закон изменения тока (i_H), который является одним из типовых для микросварки [1] (**рис. 5**).

На **рис. 6, а** приведены диаграммы изменения тока в ветвях схемы при нерегулируемом разряде стационарного энергонакопителя на нагрузку. Здесь видно, что ток аккумуляторной батареи (i_A) нарастает довольно медленно, ток суперконденсаторов ($i_{СК}$) нарастает значительно быстрее, а скорость нарастания тока электролитического конденсатора (i_K) самая высокая. Ток в нагрузке является суммой всех этих трех токов, что обеспечивает его стабильность на исследуемом интервале времени, равном типовой длительности сварочного импульса. Поддержание тока нагрузки на самом начальном участке формирования тока определяется конденсатором, а на среднем и конечном — суперконденсатора-

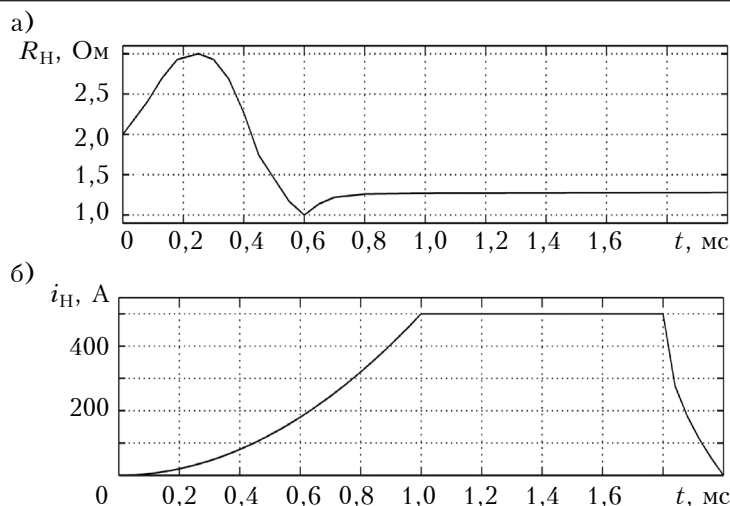


Рис. 5. Диаграммы изменения сопротивления (а) и тока (б) нагрузки

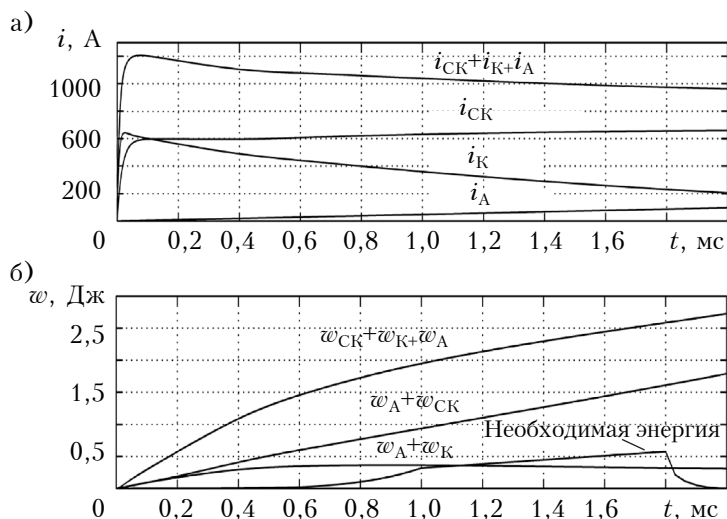


Рис. 6. Диаграммы изменения тока в ветвях схемы (а) и выделяемой в нагрузку энергии (б) при нерегулируемом разряде стационарного энергонакопителя на нагрузку

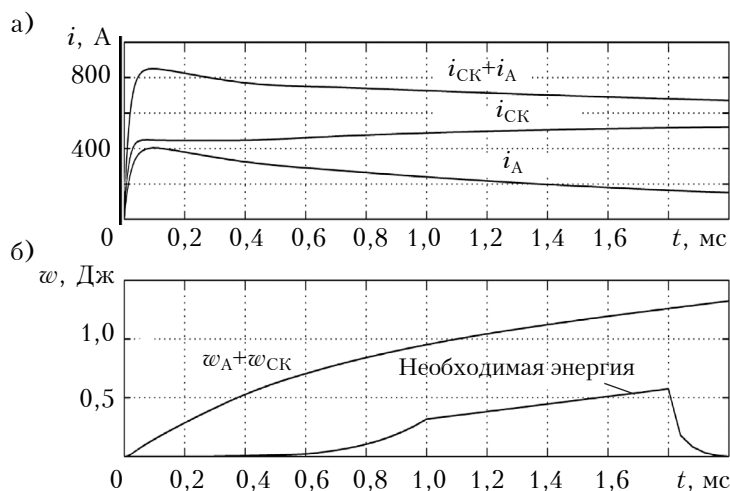


Рис. 7. Диаграммы изменения тока в ветвях схемы (а) и выделяемой в нагрузку энергии (б) при нерегулируемом разряде портативного энергонакопителя на нагрузку

ми. Роль аккумулятора становится более заметной на конечном участке.

На рис. 6, б показаны диаграммы изменения энергии, выделяемой в нагрузку при нерегулируемом разряде накопительных элементов в различных комбинациях, а также энергии, необходимой для формирования импульса сварочного тока с заданными параметрами (см. рис. 5, б). Как видно из рисунка, энергия, которую обеспечивает накопитель «аккумуляторная батарея + конденсатор» ($w_A + w_K$), ниже необходимого уровня на среднем участке формирования тока. Это связано с тем, что конденсатор к этому времени уже успевает существенно разрядиться, а ток аккумулятора еще не успевает нарасти. Накопитель «аккумуляторная батарея + суперконденсаторы» ($w_A + w_{CK}$) обеспечивает необходимую энергию на всем интервале времени с достаточным запасом. Вариант накопителя, включающий все три типа элементов, обеспечивает энергию ($w_A + w_K + w_{CK}$), уровень которой можно считать избыточным в данном случае.

На рис. 7 представлены диаграммы изменения тока в ветвях схемы и энергии портативного энергонакопителя, в состав которого входит набор аккумуляторных батарей небольшой емкости и суперконденсаторы. Как видно из рисунка, такой энергонакопитель также обеспечивает достаточную для сварочного импульса энергию, хотя и меньшую, чем стационарный.

Энергетические возможности двух описанных вариантов гибридных энергонакопителей, определяемые емкостью аккумуляторных батарей, оценим путем расчета количества сварочных импульсов с заданными параметрами (см. рис. 5, б), которые они способны обеспечить до достижения допустимой глубины разряда.

Примем допустимую глубину разряда батареи ξ равной 70% от полного заряда, и тогда

$$\xi W_A = n W_{II} \quad (1)$$

где W_A — максимальная энергия, накопленная в аккумуляторе;

W_{II} — энергия, необходимая для одного сварочного импульса;

n — количество сварочных импульсов.

Энергию, необходимую для одного сварочного импульса, рассчитаем по формуле

$$W_{\text{И}} = I_{\text{Н.ср}}^2 R_{\text{Н.ср}} t_{\text{И}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{Н.ср}}$, $R_{\text{Н.ср}}$ — средние значения тока в нагрузке и сопротивления нагрузки на интервале формирования сварочного импульса длительностью $t_{\text{И}}$:

$$I_{\text{Н.ср}} = \frac{1}{t_{\text{И}}} \int_0^{t_{\text{И}}} i_{\text{Н}}(t) dt; \quad (3)$$

$$R_{\text{Н.ср}} = \frac{1}{t_{\text{И}}} \int_0^{t_{\text{И}}} r_{\text{Н}}(t) dt. \quad (4)$$

Таким образом, количество сварочных импульсов, которое способен обеспечить автономный источник питания с энергонакопителем, можно определить по формуле

$$n = \frac{\xi W_{\text{А}}}{I_{\text{Н.ср}}^2 R_{\text{Н.ср}} t_{\text{И}}}. \quad (5)$$

Согласно расчетам, энергонакопитель на основе автомобильного аккумулятора может обеспечить примерно $6 \cdot 10^6$ импульсов, а энергонакопитель на основе аккумуляторов малой емкости — почти на два порядка меньше — около $7 \cdot 10^4$ импульсов. Отметим, что при изготовлении одного изделия (микросхемы, аккумуляторной батареи, электромеханического фильтра и др.) число сварочных операций исчисляется единицами или десятками. То есть, на протяжении одного цикла разряда энергонакопителя можно изготовить несколько тысяч изделий в случае его портативного исполнения и несколько десятков тысяч штук в случае стационарного.

Выводы

Результаты исследования показали, что оба рассмотренных варианта гибридных энергонакопителей, содержащих аккумуляторные батареи и суперконденсаторы, обладают высокими динамическими характеристиками и энергетической эффективностью для формирования необходимого количества импульсов сварочного тока с заданными параметрами. Очевидно, что такие энергонакопители могут быть перспективными для использования в автономных источниках питания установок контактной микросварки, поэтому продолжением проведенной работы станет экспериментальная проверка результатов имитационного моделирования, а также выявление оптимальных соотношений значений энергии накопительных элементов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бондаренко А. Ф. Формирователи импульсов тока для установок контактной микросварки / Дис. ... канд. техн. наук. — Алчевск, 2007.
2. Bondarenko O. F., Safronov P. S., Bondarenko Yu. V., Sydorets V. M. Direct energy and energy storage circuit topologies of DC power supplies for micro resistance welding // Proc. of IEEE 34th International scientific conference on electronics and nanotechnology (ELNANO). — 2014. — P. 468–470. — DOI: 10.1109/ELNANO.2014.6873431.
3. Guerrero M., Romero E., Barrero F., Milanés M., González E. Supercapacitors: Alternative energy storage systems // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). — 2009. — Vol. 85, N 10. — P. 188–195.
4. Pay S., Baghzouz Y. Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles // IEEE Bologna power tech conference. — Italy, Bologna. — 2003. — P. 385–390. — DOI: 10.1109/PTC.2003.1304472.
5. Бондаренко Ю. В., Сидорец В. М., Сафронов П. С., Бондаренко О. Ф. Оцінка точності регулювання струму багатокоміркового транзисторного перетворювача з комбінованим керуванням // Технічна електродинаміка. — 2012. — № 2. — С. 67–68.
6. Панкрашкин А. Ионисторы Panasonic: физика, принцип работы, параметры http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2006_9_12.php. — 23.05.2014.
7. Hushens M. Meeting peak power requirements with supercapacitors <http://www.dataweek.co.za/news.aspx?pklnwsid=39947>. — 23.05.2014.
8. Marco S. W. Chan, K. T. Chau, C. C. Chan. Effective Charging Method for Ultracapacitors // Journal of Asian Electric Vehicles. — 2005. — Vol. 3, N 2. — P. 771–776. — DOI: 10.4130/jaev.3.771.
9. Конденсаторы: Справочник / И. И. Четверткова, М. Н. Дьяконова. — Москва: Радио и связь, 1993.
10. Паэранд Ю. Э., Бондаренко А. Ф., Бондаренко Ю. В. Комбинированный накопитель энергии «аккумуляторная батарея — электролитический конденсатор» // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. — 2008. — Ч. 6. — С. 76–79.
11. Здрок А. Г. Выпрямительные устройства стабилизации напряжения и заряда аккумулятора. — Москва: Энергоатомиздат, 1988.
12. Розанов Ю. К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты. — Москва: Энергоатомиздат, 1987.
13. Datasheet. BC Series Ultracapacitors. Doc. No. 1017105.4 http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/bcseries_ds_1017105-4.pdf. — 23.05.2014.
14. Product Guide. Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors. Doc. No. 1014627.1 http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/1014627_boostcap_product_guide.pdf. — 23.05.2014.
15. Оксидно-электролитический алюминиевый конденсатор K50-77 http://www.elecond.ru/k50_77.php. — 23.05.2014.
16. GP Batteries http://www.gpina.com/pdf/GP130AANE_DS.pdf. — 23.05.2014.
17. Атауш В. Е., Леонов В. П., Москвин Э. Г. Микросварка в приборостроении. — Рига: РТУ, 1996.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 12.06 2014 г.*

Ю. В. БОНДАРЕНКО¹, П. С. САФРОНОВ¹, О. Ф. БОНДАРЕНКО¹,
В. М. СИДОРЕЦЬ², Т. С. РОГОЗИНА¹

Україна, м. Алчевськ, ¹Донбаський державний технічний університет;
м. Київ, ²Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ГІБРИДНІ ЕНЕРГОНАКОПИЧУВАЧІ НА ОСНОВІ АКУМУЛЯТОРІВ ТА СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ДЛЯ КОНТАКТНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ

За допомогою імітаційного моделювання показано можливість застосування в установках контактного мікрозварювання гібридних енергонакопичувачів на основі акумуляторних батарей та суперконденсаторів, які мають високі енергетичні та динамічні характеристики, достатні для забезпечення формування імпульсів зварювального струму з необхідними параметрами.

Ключові слова: автономне джерело живлення, енергонакопичувач, суперконденсатор, акумуляторна батарея, контактне мікрозварювання.

DOI: 10.15222/ТКЕА2014.4.33
UDC 621.314.1: 621.311.61

Yu. V. BONDARENKO, P. S. SAFRONOV,
O. F. BONDARENKO, V. M. SYDORETS, T. S. ROGOZINA
Ukraine, Alchevsk, ¹Donbas State Technical University;
Kiev, ²Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

THE HYBRID ENERGY STORAGE BASED ON BATTERIES AND ULTRACAPACITORS FOR CONTACT MICROWELDING

Micro resistance welding is an effective way to reliably join small-scale parts. It is widely used in electronics and instrument-making. The important particularities of micro resistance welding are pulse character of energy consumption, non-linear load and special form of current pulses. So, these particularities of welding process cause negative influence on the mains. One of the known ways to avoid it is to use autonomous power supplies for micro resistance welding machines. The important task for building autonomous power supplies is to choose effective energy storages, which have high capacity and small internal resistance, and which are capable to be charged and deliver energy to load very quickly. The solution of this task is seen in using hybrid energy storages, which include accumulators and ultracapacitors. The accumulators are able to provide high energy capacitance and the ultracapacitors are able to provide fast energy delivery. The possibility of application of hybrid energy storages, based on accumulator batteries and ultracapacitors, in micro resistance welding machines is confirmed with computer simulation. Two variants of hybrid energy storages are proposed. These hybrid energy storages have high power and dynamic characteristics, which are sufficient to generate current pulses for welding according to necessary settings.

Keywords: autonomous power supply, energy storage, ultracapacitor, accumulator, micro resistance welding.

REFERENCES

1. Bondarenko O. F. [Current pulses generators for micro resistance welding machines]. PhD thesis, Alchevsk, 2007, 211 p. (in Russian)
2. Bondarenko O. F., Safronov P. S., Bondarenko Yu. V., Sydorets V. M. Direct Energy and Energy Storage Circuit Topologies of DC Power Supplies for Micro Resistance Welding *Proceedings of IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2014, pp. 468-470. DOI: 10.1109/ELNANO.2014.6873431.
3. Guerrero M., Romero E., Barrero F., Milanés M., González E. Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2009, vol. 85, no 10, pp. 188-195.
4. Pay S., Baghzouz Y. Effectiveness of Battery-Supercapacitor Combination in Electric Vehicles. *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Italy, Bologna, 2003, pp. 385-390. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304472.
5. Bondarenko Yu. V., Sydorets V. M., Safronov P. S., Bondarenko O. F. [The evaluation of current regulation accuracy of multicell-type transistor converter with combined control]. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2012, no 2, pp. 67-68 (in Ukrainian).
6. Pankrashkin A. [Supercapacitors Panasonic: physics, operation principle, parameters] http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2006_9_12.php. — 23.05.2014..
7. Huschens M. Meeting peak power requirements with supercapacitors <http://www.dataweek.co.za/news.aspx?pklnsid=39947>. — 23.05.2014.
8. Marco S. W. Chan, K. T. Chau, C. C. Chan. Effective Charging Method for Ultracapacitors. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 2005, vol. 3, N 2, pp. 771-776. DOI: 10.4130/jaev.3.771.
9. *Capacitors: Reference book*. Moscow, Radio i sviaz, 1993, 392 p. (in Russian)
10. Paerand Yu. E., Bondarenko O. F., Bondarenko Yu. V. [The combined energy storage «battery — electrolytic capacitor»]. *Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. Problemi suchasnoyi elektrotehniki*, 2008, part. 6, pp. 76-79. (in Russian)
11. Zdrok A. G. [Rectifier devices for voltage stabilization and battery charging]. Moscow, Energoatomizdat, 1988, 144 p. (in Russian)
12. Rozanov Yu. K. [Semiconductor converters with high frequency unit]. Moscow, Energoatomizdat, 1987, 184 p. (in Russian)
13. Datasheet. BC Series Ultracapacitors. Doc. No. 1017105.4 http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/bcseries_ds_1017105-4.pdf. — 23.05.2014.
14. Product Guide. Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors. Doc. No. 1014627.1 http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/1014627_boostcap_product_guide.pdf. — 23.05.2014.
15. [Oxide electrolytic aluminum capacitor K50-77]. http://www.elecond.ru/k50_77.php. — 23.05.2014.
16. GP Batteries http://www.gpina.com/pdf/GP130AAHE_DS.pdf. — 23.05.2014.
17. Ataush V.E., Leonov V.P., Moskvina E.G. [Micro resistance welding in instrument making]. Riga, RTU, 1996, 332 p. (in Russian)

Д. ф.-м. н. Е. Ф. ВЕНГЕР, к. ф.-м. н. П. М. ЛИТВИН, д. ф.-м. н. Л. А. МАТВЕЕВА,
к. ф.-м. н. В. Ф. МИТИН, В. В. ХОЛЕВЧУК

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ
E-mail: mitin@microsensor.com.ua, matveeva@isp.kiev.ua

ПОЛУЧЕНИЕ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ НАНОНЕОДНОРОДНЫХ ПЛЕНОК Ge НА GaAs-ПОДЛОЖКАХ

Исследована технология конденсации в вакууме тонких нанонеоднородных пленок Ge на полуизолирующие подложки GaAs (100). Использованы методы атомно-силовой микроскопии, оптической спектроскопии, измерения внутренних механических напряжений в пленке и ее электронных свойств. Показана возможность получения тонких нанонеоднородных монокристаллических бездислокационных пленок с низким уровнем механических напряжений, двумерной перколяционной электропроводностью и высокой термической чувствительностью, которые могут быть использованы в ИК и электронной технике.

Ключевые слова: пленки германия, скорость роста, морфология поверхности, электронные и оптические свойства, внутренние механические напряжения.

Пленки германия на GaAs-подложках, несомненно, являются перспективным материалом для практического использования. На их основе разработаны высокоэффективные солнечные элементы, полевые транзисторы, СВЧ-диоды, сенсоры физических величин (тензодатчики, термометры сопротивления, детекторы магнитного поля, рентгеновского и оптического излучения). При современном уровне науки и техники особое внимание уделяется нанотехнологиям, наноматериалам и наногетероструктурам. Результаты наших предыдущих исследований гетеросистем Ge/GaAs представлены в [1–6]. Настоящая работа посвящена исследованию взаимосвязи условий получения случайно нанонеоднородных тонких (1–250 нм) пленок германия с их наноструктурой и физическими свойствами. Целью работы являлась отработка технологии, позволяющей получать пленки Ge с такими физическими свойствами, которые открывают новые возможности для усовершенствования приборов сенсорной и инфракрасной техники. К таким приборам относятся, прежде всего, контактные или бесконтактные болометрические измерители температуры.

Технология и методы исследования

Пленки толщиной 1–250 нм получали на универсальной вакуумной установке ВУП-5 М термическим осаждением Ge в вакууме ($2 \cdot 10^{-4}$ Па) на полуизолирующие подложки GaAs (100) с

Основными результатами были получены в рамках проекта 2.2.6.15 Государственной целевой научно-технической программы «Нанотехнологии и наноматериалы».

удельным сопротивлением $\rho = 10^7$ Ом·см. Они были получены при одной и той же температуре подложки из диапазона 450–500°C, но с разной скоростью роста — от 0,02 до 0,35 нм/с.

Методы исследования включали атомно-силовую микроскопию (АСМ), просвечивающую электронную микроскопию, электронографию, а также измерения эффекта Холла, температурной зависимости электропроводности и внутренних механических напряжений. Для определения энергетического спектра носителей заряда в пленках и особенностей их зонной структуры использован метод оптической спектроскопии в области края собственного поглощения прямого перехода E_0 в центре зоны Бриллюэна, включая «хвосты» плотности состояний в запрещенной зоне германия. Наноморфологию поверхности пленки исследовали на атомно-силовом микроскопе Nanoscope IIIa в режиме периодической моды. Оптические измерения проводили на инфракрасном спектрометре ИКС-22 при комнатной температуре. Величину и знак внутренних механических напряжений определяли по формуле Стоуни [7], которая связывает упругую деформацию в пленке с кривизной изогнутой гетеросистемы и толщиной пленки t .

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

Обсуждение результатов

Все пленки имели монокристаллическую структуру. Граница раздела «пленка — подложка» в гетеросистемах была резкой, когерентной, без

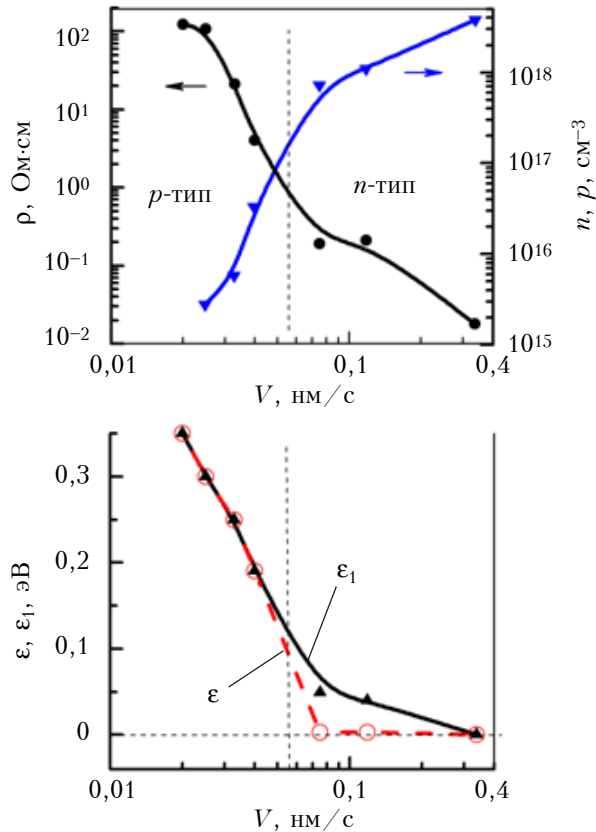


Рис. 1. Зависимость параметров пленок Ge на GaAs-подложках от скорости их осаждения V

дислокаций несоответствия. Электрофизические и оптические свойства пленок, морфология их поверхности и внутренние механические напряжения зависели от скорости роста и толщины пленки. Как видно из **рис. 1**, полученные при большой скорости роста пленки имели n -тип проводимости, высокую концентрацию электронов ($n = 4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) и низкое удельное сопротивление ($\rho = 0,018 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) с нулевой энергией активации ϵ_1 . Полученные при малой скорости роста пленки имели p -тип проводимости, низкую концентрацию свободных носителей заряда ($p = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) и высокое удельное сопротивление ($\rho = 120 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Его температурная зависимость имела активационный характер: $\rho(T) = \rho_1 \exp(\epsilon_1/(kT))$, а значение энергии активации достигало половины ширины запрещенной зоны германия.

Полученные при больших скоростях роста пленки имеют практически гладкую поверхность, что видно из **рис. 2**. Для пленок, осажденных со скоростью роста 0,35 nm/s , среднеквадратичное значение шероховатости поверхности (RMS) составляет всего лишь 0,5–3 nm . С уменьшением скорости роста формируются пленки с развитой рельефной поверхностью. Значение RMS достигает 15 nm при скорости роста 0,025 nm/s . Значительное различие в рельефе и морфологии поверхности пленок разной

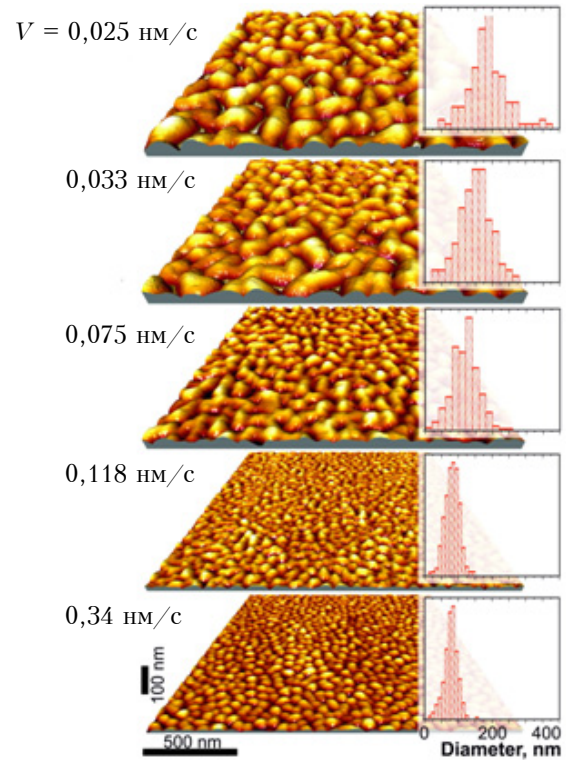


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности пленок Ge толщиной $130 \pm 30 \text{ nm}$, полученных при разной скорости осаждения, и соответствующие им гистограммы распределения размера зерен на поверхности пленки

толщины (1–250 nm), выращенных с малой и большой скоростью, видно на **рис. 3**. В пленках, выращенных при скорости осаждения 0,02 nm/s , шероховатость монотонно возрастает с увеличением их толщины и составляет 27 nm при толщине пленки 250 nm . В пленках, выращенных при скорости осаждения 0,35 nm/s , шероховатость поверхности сначала возрастала и достигала своего максимального значения при толщине пленки 20 nm , а затем монотонно уменьшалась с увеличением ее толщины. На начальной стадии роста пленок появлялся тонкий нанозернистый слой толщиной 1 nm с характерным диаметром зерен 9 nm . При дальнейшем росте пленки нанозерна срастались с образованием пор, плотность и размер которых уменьшались с увеличением толщины пленки. При толщине пленки 50 nm поры исчезали, значение RMS не превышало 0,5–0,7 nm и не изменялось при дальнейшем росте пленки.

Независимо от условий получения, пленки всегда образовывались на той стороне подложки, которая в конце процесса выращивания оказывалась выпуклой. Это означает наличие в них внутренних механических напряжений сжатия. Их величина σ , как следует из **рис. 4**, определяется скоростью роста пленки при прочих равных условиях. Она уменьшается от 670 до 200 МПа при снижении скорости осаждения от 0,37 до 0,025 nm/s .

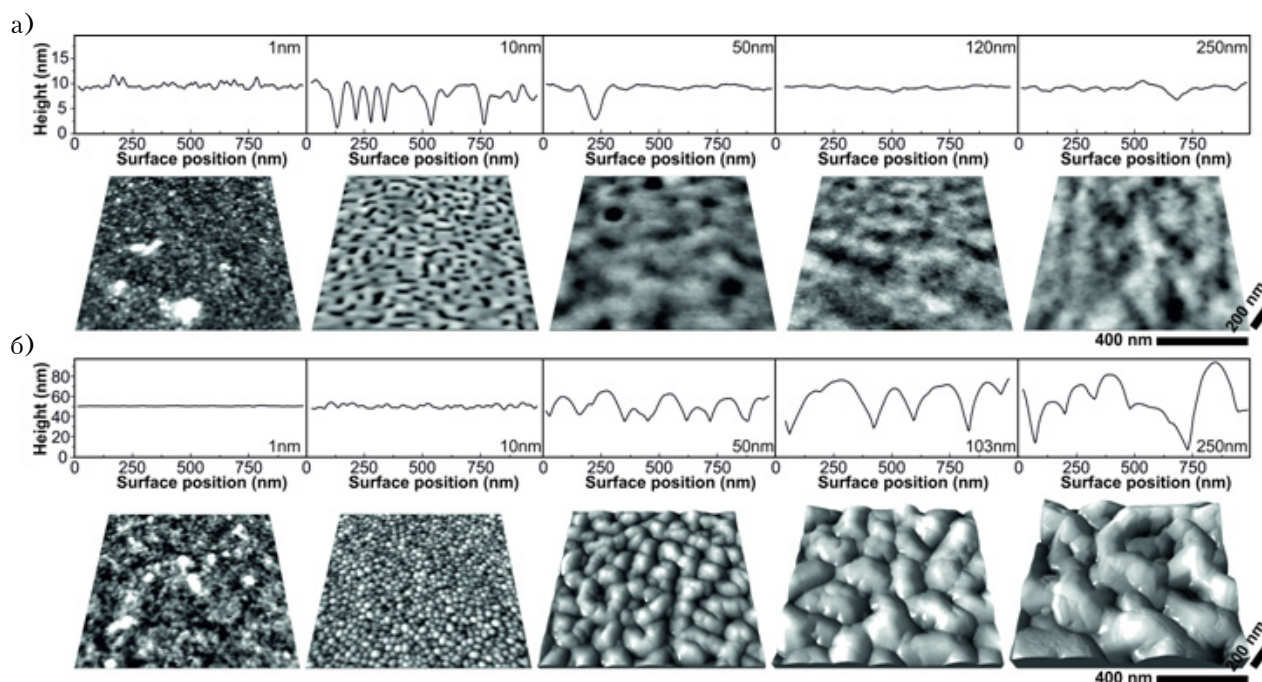


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности площадью 1×1 мкм и соответствующий профиль поверхности пленок различной толщины, полученных при скорости осаждения $0,35$ нм/с (а) и $0,02$ нм/с (б)

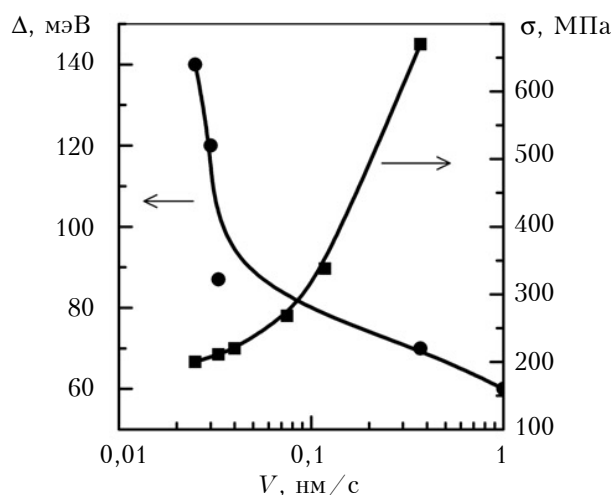


Рис. 4. Зависимость внутренних механических напряжений σ и характеристической энергии Δ от скорости осаждения V пленок толщиной 130 нм

Анализ результатов, представленных на рис. 2–4, позволяет сделать вывод, что релаксация внутренних механических напряжений в пленках, выращенных с малой скоростью, сопровождается образованием крупномасштабного рельефа на поверхности пленки с появлением в ней случайных нанонеоднородностей.

Присутствие таких нанонеоднородностей в тонких пленках Ge, выращенных при малой скорости осаждения, подтверждается также результатами спектроскопических исследований края их фундаментального поглощения в области энергий фотона, меньших ширины запре-

щенной зоны ($E < E_g$). Коэффициент поглощения D изменялся в этой спектральной области экспоненциально: $D \approx \exp[-(E_g - E)/\Delta]$. Характеристическая энергия $\Delta = dE/d\ln D$ определяет обычно размытие края фундаментального поглощения в полупроводнике при появлении хвостов плотности состояний в его запрещенной зоне. Как известно, в объемных чистых монокристаллах германия край поглощения является резким, и хвосты плотности состояний отсутствуют, что характерно для атомарных полупроводников. Для объемного аморфного германия $\Delta = 140$ мэВ [8]. Исследования толстых (больше 1 мкм) пленок Ge показали, что значение Δ в них возрастает при понижении степени совершенства их кристаллической структуры и составляет 20 , 50 и 140 мэВ для монокристаллических, поликристаллических и аморфных пленок Ge соответственно [1].

Из рис. 4 следует, что с уменьшением скорости осаждения пленки значение Δ увеличивается, достигая максимального значения 140 мэВ, характерного для аморфной структуры германия. Однако пленки, полученные с малой скоростью осаждения, были не аморфными, а монокристаллическими. Следовательно, должна существовать другая причина появления хвостов плотности состояний в запрещенной зоне эпитаксиальной монокристаллической пленки, приводящая к сильному размытию ее края поглощения.

Для непротиворечивого объяснения полученных экспериментальных результатов мы предположили, что имеют место крупномасштабные флуктуации электростатического потенциала в тонкой монокристаллической пленке, выращен-

ной с малой скоростью осаждения, а их появление вызвано случайными нанонеоднородностями в ней. Крупномасштабные флуктуации наблюдаются обычно в сильнолегированных и компенсированных образцах. Они модулируют энергетические зоны полупроводника, приводя к появлению потенциального рельефа, глубоких хвостов плотности состояний в его запрещенной зоне, и характеризуются амплитудой модуляции γ и ее пространственным масштабом r , которые зависят от характеристик случайного поля [9, 10]. Модуляция потенциального рельефа приводит к появлению областей со свободными носителями заряда в его ямах и диэлектрических областей, в которых носители заряда отсутствуют (рис. 5). В таком случае электропроводность имеет перколяционную природу и характеризуется уровнем протекания ϵ_p .

При высоких температурах ($T > 250$ К для исследованных пленок германия) электропроводность осуществляется термоэмиссией носителей заряда с уровня Ферми ϵ_F на уровень протекания ϵ_p и характеризуется энергией активации $\epsilon_1 = |\epsilon_p - \epsilon_F|$. При понижении температуры становится более выгодным энергетически процесс туннелирования носителей заряда в окрестности ϵ_F в соседние ямы рельефа потенциала, что приводит к уменьшению ϵ_1 .

Характерной фундаментальной особенностью перколяционных систем является зависимость порога протекания ϵ_p от размерности пространства (рис. 5). Трехмерный 3D-рельеф (при $t \gg r$) понижает ϵ_p . Для 3D-потенциала $\epsilon_p^{(3D)} = -0,68\gamma$, а для 2D-рельефа ($t \leq r$) $\epsilon_p^{(2D)} = 0$, что соответствует среднему значению $E(r)$. Для 3D-рельефа энергия активации сопротивления $\epsilon_1 = 0,68\gamma$, а для 2D-рельефа $\epsilon_1 = \gamma$. Таким образом, в нанонеоднородном перколяционном, сильнолегированном и полностью компенсированном германии с 3D-потенциальным рельефом энергия

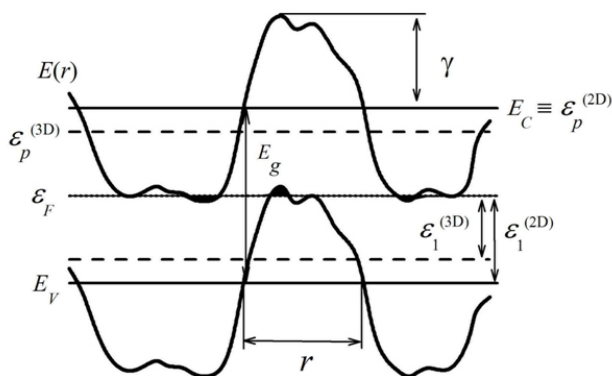


Рис. 5. Энергетическая схема полупроводника с флуктуациями электростатического потенциала:

E_C и E_V — энергии дна зоны проводимости и потолка валентной зоны соответственно; E_g — энергия запрещенной зоны; ϵ_F — уровень Ферми; ϵ_p — уровень протекания

активации электропроводности не превышает $\epsilon_1 = 0,68(E_g/2) = 0,25$ эВ (при 300 К $E_g/2 = 0,37$ эВ [11, 12]). Поэтому мы предположили, что в тонких пленках (до 100 нм), в которых энергия активации близка или равна $E_g/2$, существует 2D-потенциальный рельеф, и наблюдается двумерная перколяционная электропроводность. Оценки показывают [2, 3], что пространственный масштаб 2D-потенциального рельефа электростатического потенциала может быть сравним с толщиной пленки, полученной при малой скорости осаждения.

Кроме того, было установлено, что в пленках Ge с 2D-перколяцией энергия активации электропроводности может быть больше половины ширины электрической запрещенной зоны Ge (0,37 эВ). Это обусловлено тем, что дополнительно имеет место температурная зависимость подвижности носителей заряда на уровне протекания, т. е. под воздействием температуры подвижность носителей заряда увеличивается благодаря термоактивационному преодолению мелких потенциальных ям (ловушек), которые находятся на уровне протекания. Нами были получены пленки, в которых энергия активации электропроводности достигает 0,41 эВ.

Практическое использование пленок

Благодаря своей хорошей термочувствительности, нанонеоднородные тонкие пленки германия перспективны для изготовления чувствительных элементов, которые могут быть использованы как для контактного, так и для бесконтактного болометрического измерения температуры, в частности в термочувствительных матрицах неохлаждаемых тепловизоров. Температурный коэффициент сопротивления $\text{TKC} = (1/R)(dR/dT)$ может достигать $-5,6 \text{ \% K}^{-1}$ при комнатной температуре. В случае экспоненциальной зависимости сопротивления от температуры TKC определяется как $\text{TKC} = \epsilon_1/kT^2$. На рис. 6 приведена зависимость сопротивления и TKC от температуры для терморезистора на основе пленки Ge на GaAs с энергией активации электропроводности $\epsilon_1 = 0,41$ эВ.

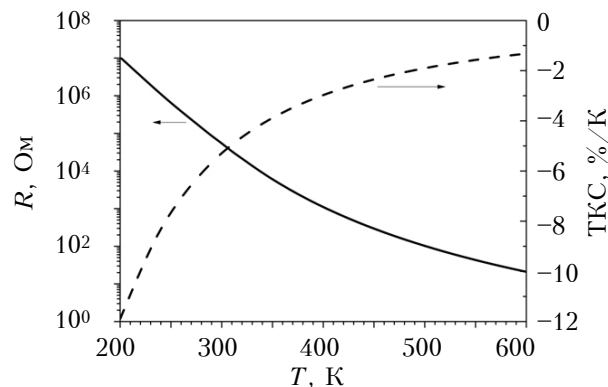


Рис. 6. Температурная зависимость электрического сопротивления R и TKC терморезистора на основе пленки Ge на GaAs

Для использования такого терморезистора в гибридных матрицах неохлаждаемых тепловизоров, а также с целью применения терморезистора для исследования и диагностики свойств жидкостей и газов в условиях турбулентных потоков, были изготовлены сенсоры размером $0,15 \times 0,1 \times 0,03$ мм, которые имели специальные гибкие золотые балочные электрические выводы шириной 0,1 мм и толщиной 0,006 мм. Исследования показали возможность регистрации температуры таким терморезистором с точностью не хуже 0,01 К и инерционностью не хуже 0,01 с при комнатной температуре.

Выводы

Результаты исследования свойств наноразмерных монокристаллических нанонеоднородных пленок Ge на подложках из полупроводникового GaAs в зависимости от технологии их изготовления позволили выявить дополнительные возможности их практического применения в инфракрасной и сенсорной технике.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Венгер Є. Ф., Конакова Р. В., Матвеева Л. О., Матіюк І. М., Мітін В. Ф., Мітін Є. В., Одарич В. А., Руденко О. В., Семенко М. П., Хименко М. В., Холевчук В. В. Плівки германію на арсеніді галію: структурні, електронні та оптичні властивості // Фізика і хімія твердого тіла. — 2009. — Т. 10, № 2. — С. 315–324.
2. Mitin V. F. Preparation and properties of heavily doped and strongly compensated Ge films on GaAs // Journal of Applied Physics. — 2010. — Vol. 107, Iss. 3. — P. 033720. — DOI: 10.1063/1.329096.
3. Mitin V. F., Lazarov V. K., Lytvyn P. M., Hasnip P. J., Kholevchuk V. V., Matveeva L. A., Kolyadina E. Yu., Kotenko I. E., Mitin V. V. and Venger E. F. Tailoring the electrical properties of Ge/GaAs by film deposition rate and preparation of fully compensated Ge films // Physical Review B. — 2011. — Vol. 84. — P. 125316. — DOI: 0.1103/PhysRevB.84.125316.
4. Lazarov V. K., Lari L., Lytvyn P. M., Kholevchuk V. V. and Mitin V. F. Structural study of Ge/GaAs thin films // Journal of Physics: Conference Series 371. — 2012. — P. 012040. — DOI:10.1088/1742-6596/371/1/012040.
5. Mitin V. F., Lazarov V. K., Lari L., Lytvyn P. M., Kholevchuk V. V., Matveeva L. A., Mitin V. V., Venger E. F. Effect of film growth rate and thickness on properties of Ge/GaAs(100) // Thin Solid Films. — 2014. — Vol. 550. — P. 715–722. — DOI: 10.1016/j.tsf.2013.10.049.
6. Kholevchuk V. V., Kladko V. P., Kuchuk A. V., Lytvyn P. M., Matveeva L. A., Mitin V. F. Study of structure and intrinsic stresses of Ge thin films on GaAs // Proceed. of the International Conference “Nanomaterials: Application and Properties”. — Ukraine, Alushta. — 2013. — Vol. 2, N 1. — P. 01PC120.
7. Гофман Р. У. Механические свойства тонких конденсированных пленок // В кн. Физика тонких пленок / Под. ред. В. Г. Хасс, Р. Э. Тун. — Москва: Мир, 1968. — С. 225–298.
8. Lastovickova M. Some differences in the exponential tail behaviour of the fundamental absorption edge in amorphous and crystalline materials // Czech. J. Phys. B. — 1972. — Vol. 22. — P. 418–424.
9. Skinner B., Chen T., Shklovskii B.I. Why is the bulk resistivity of topological Insulator so small? // Phys. Rev. Lett. — 2012. — Vol. 109. — P. 176801. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.176801.
10. Chen T. and Shklovskii B.I. Anomalously small resistivity and thermopower of strongly compensated semiconductors and topological insulators // Phys. Rev. B. — 2013. — Vol. 87. — P. 165119. — DOI: 10.1103/PhysRevB.87.165119.
11. Dunlap W. C. Some properties of high resistivity p-type germanium // Phys. Rev. — 1950. — Vol. 79. — P. 286–292.
12. Morin F. J. and Maita J. P. Conductivity and Hall effect in the intrinsic range of germanium // Phys. Rev. — 1954. — Vol. 94. — P. 1525–1529.

Дата поступления рукописи
в редакцию 16.05 2014 г.

Є. Ф. ВЕНГЕР, П. М. ЛИТВИН, Л. О. МАТВЕЄВА,
В. Ф. МІТІН, В. В. ХОЛЕВЧУК

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ
E-mail: mitin@microsensor.com.ua, matveeva@isp.kiev.ua

ОТРИМАННЯ, ВЛАСТИВОСТІ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТОНКИХ НАНОНЕОДНОРІДНИХ ПЛІВОК Ge НА GaAs-ПІДКЛАДКАХ

Досліджено технологію конденсації у вакуумі тонких нанонеоднорідних плівок Ge на напівізолюючих підкладках GaAs (100). Використано методи атомно-силової мікроскопії, оптичної спектроскопії, вимірювання внутрішніх механічних напружень у плівці та її електронних властивостей. Показано можливість отримання тонких нанонеоднорідних монокристалічних бездислокаційних плівок з низьким рівнем механічних напружень, двовірною перколяційною провідністю та високою термічною чутливістю, які можуть бути використані в інфрачервоній та електронній техніці.

Ключові слова: плівки германію, швидкість росту, морфологія поверхні, електронні та оптичні властивості, внутрішні механічні напруження.

DOI: 10.15222/TKEA2014.4.39
UDC 621.315.596

E. F. Venger, P. M. Lytvyn, L. A. Matveeva,
V. F. Mitin, V. V. Kholevchuk

Ukraine, Kyiv, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NASU

E-mail: mitin@microsensor.com.ua, matveeva@isp.kiev.ua

FABRICATION, PROPERTIES AND APPLICATION OF Ge-on-GaAs THIN NANOHETEROGENEOUS FILMS

Ge thin films condensation in vacuum onto semiinsulating GaAs(100) substrates was investigated. The methods of atomic-force microscopy, optical spectroscopy, measurement of intrinsic mechanical stresses in film, and electronic properties were used for this investigation. It was found that it is possible to obtain thin nanoheterogeneous monocrystalline dislocation-free films with low intrinsic mechanical stresses and two-dimension percolation-type conductivity, as well as high temperature sensitivity that can be used for IR and electronics technologies.

Keywords: Ge films, growth rate, surface morphology, electronic and optical properties, intrinsic mechanical stresses.

REFERENCES

1. Venger E.F., Konakova R.V., Matveeva L.A., Matiyuk I.M., Mitin V.F., Mitin E.V., Odarych V.A., Rudenko O.V., Semen'ko M.P., Khymenko M.V., Kholevchuk V.V. [Germanium films on Gallium arsenide: structural, electronic, and optical properties]. *Fizika i khimiya tverdogo tila*. 2009, vol. 10, no 2, pp. 315-324. (in Ukrainian)
2. Mitin V. F. Preparation and properties of heavily doped and strongly compensated Ge films on GaAs. *Journal of Applied Physics*. 2010, vol. 107, iss. 3, pp. 033720. DOI: 10.1063/1.329096.
3. Mitin V. F., Lazarov V. K., Lytvyn P. M., Hasnip P. J., Kholevchuk V. V., Matveeva L. A., Kolyadina E. Yu., Kotenko I. E., Mitin V. V. and Venger E. F. Tailoring the electrical properties of Ge/GaAs by film deposition rate and preparation of fully compensated Ge films. *Physical Review B*. 2011, vol. 84, pp. 125316. DOI: 0.1103/PhysRevB.84.125316.
4. Lazarov V. K., Lari L., Lytvyn P. M., Kholevchuk V.V. and Mitin V.F. Structural study of Ge/GaAs thin films. *Journal of Physics: Conference Series* 371. 2012, pp. 012040. DOI:10.1088/1742-6596/371/1/012040.
5. Mitin V. F., Lazarov V. K., Lari L., Lytvyn P.M., Kholevchuk V. V., Matveeva L. A., Mitin V. V., Venger E. F. Effect of film growth rate and thickness on properties of Ge/GaAs(100). *Thin Solid Films*. 2014, vol. 550, pp. 715-722. DOI: 10.1016/j.tsf.2013.10.049.
6. Kholevchuk V. V., Kladko V. P., Kuchuk A. V., Lytvyn P. M., Matveeva L. A., Mitin V. F. Study of structure and intrinsic stresses of Ge thin films on GaAs. *Proceedings of the International Conference "Nanomaterials: Application and Properties"*. Ukraine, Alushta. 2013, vol 2, no 1, pp. 01PC120.
7. Goffman R.U. [Mechanical properties of thin condensed films]. In book: *Fizika tonkich plenok* [Physics of Thin Films]. Ed. by: V. G. Khass, R. E. Tun. Moscow. Mir. 1968, pp. 225-298. (in Russian)
8. Lastovickova M. Some differences in the exponential tail behaviour of the fundamental absorption edge in amorphous and crystalline materials. *Czech. J. Phys. B*. 1972, vol. 22, pp. 418-424.
9. Skinner B., Chen T., Shklovskii B.I. Why is the bulk resistivity of topological insulator so small? *Phys. Rev. Lett.* 2012, vol.109, pp. 176801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.176801.
10. Chen T. and Shklovskii B. I. Anomalous small resistivity and thermopower of strongly compensated semiconductors and topological insulators. *Phys. Rev. B*. 2013, vol. 87, pp.165119. doi: 10.1103/PhysRevB.87.165119.
11. Dunlap W. C. Some properties of high resistivity p-type germanium. *Phys. Rev.* 1950, vol. 79, pp. 286-292.
12. Morin F. J. and Maita J. P. Conductivity and Hall effect in the intrinsic range of germanium. *Phys. Rev.* 1954, vol. 94, pp. 1525-1529.

К. ф.-м. н. С. И. БУДЗУЛЯК, д. ф.-м. н. Д. В. КОРБУТЯК, к. т. н. А. П. ЛОЦЬКО, к. ф.-м. н. Н. Д. ВАХНЯК, к. ф.-м. н. С. М. КАЛИТЧУК, к. ф.-м. н. Л. А. ДЕМЧИНА, д. т. н. Р. В. КОНАКОВА, к. ф.-м. н. В. В. ШИНКАРЕНКО, д. ф.-м. н. А. В. МЕЛЬНИЧУК*

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины;

*Нежинский государственный университет имени Николая Гоголя

E-mail: kdv45@isp.kiev.ua, shynkarenko@isp.kiev.ua

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИМЕСНО-ДЕФЕКТНЫХ КОМПЛЕКСОВ В CdTe:Cl ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СВЧ-ОБЛУЧЕНИЯ

Методом низкотемпературной фотолюминесценции исследовано влияние микроволнового излучения на трансформацию примесно-дефектных комплексов в монокристаллах CdTe:Cl. Показано, что активированные микроволновым облучением продолжительностью 10 с донорные центры Cl_{Te} и акцепторные центры V_{Cd} , имеющиеся в образцах, создают эффективные условия для формирования дефектных центров ($V_{Cd}-Cl_{Te}$), на которых связываются экситоны. Детальные исследования формы полосы фотолюминесценции донорно-акцепторных пар монокристаллов CdTe:Cl позволили определить зависимость параметра электрон-фононного взаимодействия (фактор Хуанга—Рис) от времени облучения.

Ключевые слова: теллурид кадмия, фотолюминесценция, микроволновое излучение.

Одним из направлений современной электронной техники является разработка приборов радиационного мониторинга, актуальность которого возросла после ряда катастроф на ядерных объектах. В связи с этим на первый план выступают материалы, перспективные для изготовления не охлаждаемых детекторов ионизирующего излучения. Это, например, высокоомные монокристаллы теллурида кадмия, обладающие удачным сочетанием таких своих характеристик, как большие атомные номера входящих в соединения элементов ($Z_{Cd}=48$, $Z_{Te}=52$), большая ширина запрещенной зоны ($E \approx 1,5$ эВ при 300 К) и высокая подвижность носителей заряда ($\mu_e \approx 10^3$ см²/(В·с), $\mu_h \approx 10^2$ см²/(В·с)) при комнатной температуре [1–3]. Важным требованием к детекторному материалу также является высокоомность, которая в случае с CdTe достигается путем легирования монокристаллов хлором.

Одним из технологических процессов, позволяющих влиять на распределение примеси в кристаллах, является микроволновое облучение, которое воздействует на весь образец в целом, не вызывая градиента температуры (возникающего при термическом или быстром термическом отжиге). Среди первопроходцев, изучавших эту особенность, можно отметить авторов ряда работ, например [7–9]. В настоящее время изучаются как термические, так и атермические механизмы воздействия микроволнового облучения на материалы, обнаружены технологические условия, при которых не только возрастает однородность распределения примесей в обрабатываемых образцах, но и изменяется внутреннее механическое напряжение [5, 10].

Для монокристаллов CdTe:Cl также наблюдается определенный прогресс в изучении природы дефектов, однако механизмы трансформации примесно-дефектных центров кристаллов под действием СВЧ-облучения до сих пор изучены недостаточно. В то же время, нахождение параметров технологической обработки CdTe:Cl, позволяющей управлять распределением примесей, позволит повысить качество детекторов на их основе.

В данной работе исследованы люминесцентные свойства монокристаллов CdTe:Cl и проанализированы особенности трансформации примесно-дефектных центров при различных режимах СВЧ-обработки.

Методы исследований и оборудование

Облучение исследуемых образцов проводили в рабочей камере магнетрона, нагруженно-го на квазистационарный СВЧ-генератор на частоте 2,45 ГГц. Мощность излучения составляла 7,5 Вт/см². Для исключения термического воздействия образцы облучали в течение не более чем 3 с (скважность 20–40). При этом интегральный разогрев образцов не превышал 10°C. Для исследований люминесцентных свойств использовались монокристаллы CdTe:Cl, облученные при различных экспозициях: 10, 30 и 180 с.

Спектры фотолюминесценции были получены на автоматизированной установке, которая состоит из источника излучения (оптический квантовый генератор или лампа накаливания), оптического криостата, монохроматора МДР-23 с рабочим спектральным диапазоном 200–1000 нм, фотоприемного устройства, усилителя и персонального компьютера. Для возбуждения фотолюми-

несценции (**ФЛ**) использовался гелий-неоновый лазер непрерывного действия мощностью 40 мВт (длина волны $\lambda=632,8$ нм). Диапазон терморегулирования составлял 4,2–300 К, дискретность установки температуры 0,1 К, точность стабилизации температуры 0,1 К. Спектральное разрешение во всех случаях было не хуже 1 мЭВ.

Обсуждение результатов

Спектр низкотемпературной ФЛ при температуре $T=5$ К монокристаллов CdTe:Cl в области энергий 1,3–1,5 эВ показан на **рис. 1**. Он состоит из двух полос: одна (1,45 эВ) обусловлена излучательной рекомбинацией донорно-акцепторных пар (**ДАП**), вторая (1,470–1,478 эВ) — **Y**-полоса с фононными повторениями, которую идентифицируют как полосу рекомбинации экситонов, связанных на дислокациях.

Спектральная форма донорно-акцепторных полос ФЛ с учетом фононных реплик описывается хорошо известной формулой (см., например, [9])

$$I(\omega) \sim \omega^2 \sum_{p=0} \frac{S^p}{p!} e^{-S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_0 - p\omega_{LO} - \omega}{\Gamma} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где частота ω_0 посредством постоянной Планка $\hbar$ ($\hbar\omega_0$) задает энергетическое положение нуль-фононной линии (**НФЛ**), а параметр затухания Γ через $\hbar\Gamma$ определяет ширину линии. Сумма берется по всем возможным фононным репликам ($p=0, 1, 2 \dots$). Фактор Хуанга–Рис S определяет вероятность $W_p \approx e^{-S} S^p/p!$ излучательных переходов на примесном центре с участием p LO -фононов, он может быть рассчитан по формуле Фрелиха для непрерывной среды:

$$S = [2\pi e^2 / (V\hbar\omega_{LO})] (1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_0) \sum_q |\rho_q|^2 / q^2,$$

где q — волновой вектор;

V — объем кристалла;

$\hbar\omega_{LO}$ — энергия LO -фононов;

ϵ_∞ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость;

ϵ_0 — статическая диэлектрическая проницаемость;

ρ_q — Фурье-компонента распределения плотности заряда.

Сильно локализованные на примесях основные состояния носителей описываются огибающей волновой функцией

$$\Psi_{v_i}(r) = N_{v_i} r^{v_i} \exp[-r/(v_i a_i^*)],$$

где $i=e$ для связанного состояния электрона на доноре и $i=h$ для связанного состояния дырки на акцепторе;

a_i^*, m_i^* — эффективные боровский радиус и масса соответствующего носителя, $a_i^* = \hbar^2 \epsilon_0 / (e^2 m_i^*)$;

r — радиус-вектор;

N_{v_i} — коэффициент нормирования, $N_{v_i} = [2/(v_i a_i^*)]^{v_i} / [(v_i a_i^*)^{1/2} \Gamma(v_i + 1)]$.

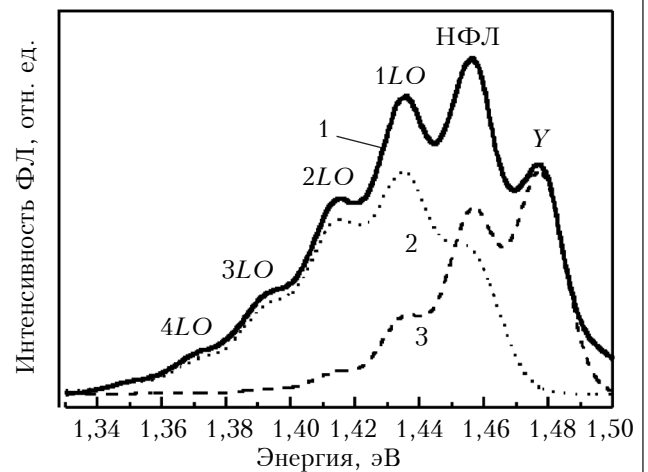


Рис. 1. Разложение экспериментального спектра ФЛ (1) в области от 1,3 до 1,5 эВ на две составляющие: ДАП (2) и **Y**-полосы (3) с их фононными повторениями

Величина v_i — это так называемый параметр квантового дефицита, который определяется из соотношения энергий:

$$v_i^2 = E_i^R / E_{D(A)},$$

где E_i^R — энергия связи носителя на примесном центре в рамках водородоподобной модели ($E_i^R = e^4 m_i^* / (2\epsilon_0^2 \hbar^2)$), а $E_{D(A)}$ является экспериментально измеренным значением энергии ионизации основного состояния соответствующего носителя.

При расчете фактора Хуанга–Рис для процесса рекомбинации на изолированном центре (доноре или акцепторе) Фурье-компонента распределения плотности заряда определяется формулой

$$\rho_{qi} = N_p \int \exp(i\mathbf{q}\mathbf{r}) r^{2(v_i-1)} \exp[-2r/(v_i a_i^*)] d^3\mathbf{r},$$

где N_p — константа нормирования, которую находят при условии $\rho_{0i}=1$.

Если излучательная рекомбинация происходит на ДАП с участием как донора, так и акцептора, то Фурье-компонента распределения общей (электрон-дырочной) плотности заряда определяется формулой

$$\rho_{eh}(\mathbf{q}) = \langle \Psi_e(r_e) \Psi_h(r_h) | \exp(i\mathbf{q}\mathbf{r}_h) - \exp(i\mathbf{q}\mathbf{r}_e) | \Psi_h(r_h) \Psi_e(r_e) \rangle. \quad (2)$$

При таком распределении заряда значение фактора Хуанга–Рис характеризует степень электрон-фононного взаимодействия и является функцией расстояния R между донором и акцептором в ДАП:

$$S(R) = \frac{e^2}{\pi \hbar \omega_{LO}} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right) \times \int_0^\infty \left[|\rho_{qe}|^2 + |\rho_{qh}|^2 - \frac{2\rho_{qe}\rho_{qh} \sin qR}{qR} \right] dq, \quad (3)$$

где ρ_{qe}, ρ_{qh} — Фурье-компонента плотности заряда электронов и дырок соответственно.

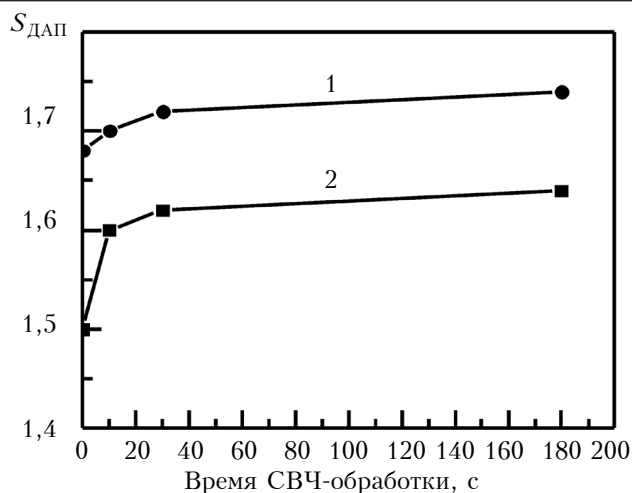


Рис. 2. Зависимость фактора Хуанга—Рис от продолжительности СВЧ-обработки монокристаллов CdTe:Cl с $N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (1) и $N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (2)

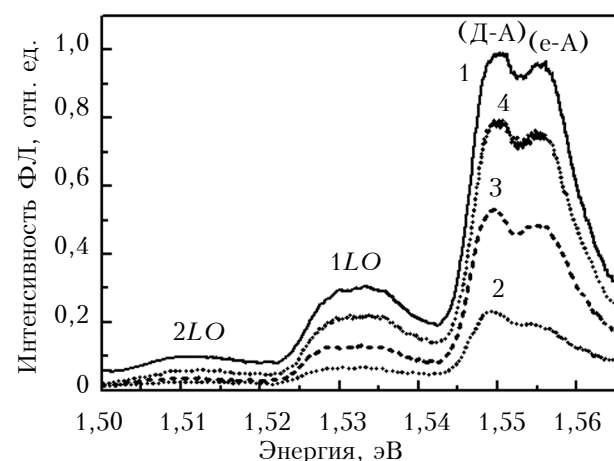


Рис. 3. Спектры «краевой» ФЛ монокристаллов CdTe:Cl с $N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ до (1) и после СВЧ-обработки продолжительностью 10 с (2), 30 с (3), 180 с (4) [6]

В [8] показано, что в результате СВЧ-обработки может происходить перераспределение примесей в кристаллах. В этом случае изменение фактора Хуанга—Рис может быть обусловлено изменением взаиморасположения примесей в приповерхностной, анализируемой, области кристалла. В частности, увеличение расстояния на несколько нанометров между донорными и акцепторными центрами в ДАП в пределах 5–20 нм приведет к ощутимому возрастанию фактора Хуанга—Рис.

В данной работе определено значение фактора Хуанга—Рис для ДАП ($S_{\text{ДАП}}$) в зависимости от продолжительности СВЧ-облучения для образцов CdTe:Cl с различным содержанием хлора: $N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (N_{Cl} — содержание Cl в исходной навеске при выращивании, а не реальная концентрация легирующей примеси в выращенных кристаллах).

В [10] установлено, что в исходных образцах CdTe:Cl с увеличением N_{Cl} от $5 \cdot 10^{17}$ до

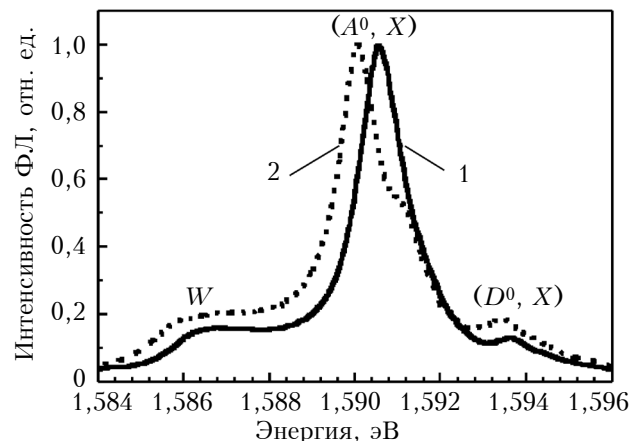


Рис. 4. Спектры ФЛ монокристаллов CdTe:Cl с $N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ до (1) и после СВЧ-обработки продолжительностью 10 с (2)

$5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ фактор Хуанга—Рис уменьшается. Физической причиной этого может быть большая неоднородность распределения и меньшее расстояние между донорами и акцепторами в кристаллах с большим содержанием Cl.

Из приведенной на рис. 2 зависимости видно, что с увеличением продолжительности СВЧ-облучения монокристаллов CdTe:Cl фактор Хуанга—Рис растет, что свидетельствует об увеличении расстояния между ДАП вследствие уменьшения их концентрации или возрастания однородности размещения донорных и акцепторных центров.

Детальный сравнительный анализ спектров «краевой» ФЛ монокристаллов CdTe:Cl с $N_{\text{Cl}} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ до и после СВЧ-обработки (рис. 3) показал, что краевая люминесценция связана с наличием в кристаллах CdTe мелких доноров (Cl_{Te}) и мелких акцепторов (V_{Cd}), точнее — с переходом электронов из зоны проводимости на мелкие акцепторные центры (линия (е-А)) и донорно-акцепторными переходами (линия (Д-А)). В низкоэнергетической области спектров «краевой» ФЛ наблюдаются LO-фононные повторения этих полос.

Как видно из рис. 3, после СВЧ-обработки продолжительностью 10 с наблюдается тушение интенсивности полос фотолюминесценции (Д-А) и (е-А), что свидетельствует об уменьшении концентрации акцепторных центров V_{Cd} в приповерхностной области кристаллов. В спектрах экситонной ФЛ монокристаллов CdTe:Cl линия (A^0, X) наиболее интенсивная (рис. 4), она связана с экситонами, локализованными на нейтральных акцепторах (Cu_{Cd}). Линию (D^0, X) идентифицируют как излучение экситонов, связанных на донорных центрах Cl_{Te} . Увеличение интенсивности ФЛ линии W , отвечающей за связанные экситоны на центрах $(\text{V}_{\text{Cd}} - \text{Cl}_{\text{Te}})$, после СВЧ-обработки кристаллов (рис. 4) является результатом увеличения концентрации сложных дефектных комплексов $(\text{V}_{\text{Cd}} - \text{Cl}_{\text{Te}})$.

Подобное изменение линий ФЛ может быть вызвано увеличением внутренних механических напряжений под воздействием СВЧ-обработки [8], что может привести к увеличению концентрации безызлучательных центров и спаду интенсивности линий ФЛ (Д-А) и (е-А) после СВЧ-обработки в течение 10 с (кривая 2 на рис. 3) и последующей релаксации этих напряжений при увеличении длительности обработки. Для подтверждения подобного предположения необходимы дальнейшие исследования.

Выводы

Таким образом, установлено, что увеличение фактора Хуанга–Рис, характеризующего степень электрон-фононного взаимодействия в донорно-акцепторных парах монокристаллов CdTe:Cl, возрастает по мере увеличения длительности СВЧ-обработки, что связано с гомогенизацией распределения донорных и акцепторных центров, а также с увеличением расстояния между донором и акцептором. СВЧ-обработка в течение 10 с образцов с содержанием Cl в исходной шихте $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ вызывает возрастание внутренних механических напряжений в кристалле, что в свою очередь приводит к уменьшению концентрации изолированных вакансий кадмия V_{Cd} вследствие формирования дефектных центров ($V_{\text{Cd}} - \text{Cl}_{\text{Te}}$), на которых связываются экситоны.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Корбутяк Д. В., Мельничук С. В., Корбут Е. В., Борисюк М. М. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості. — Київ: «Іван Федоров», 2000.
2. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В. Обзор мировых рынков кадмия, теллура и соединений на их основе // Цветная металлургия. — 2010. — № 2. — С. 31–44.

3. Del Sordo S., Abbene L., Caroli E. et al. (Review) Progress in the development of CdTe and CdZnTe semiconductor radiation detectors for astrophysical and medical applications // Sensors. — 2009. — Vol. 9. — P. 3491–3526. DOI:10.3390/s90503491

4. Ржанов А. В., Герасименко Н. Н., Васильев С. В., Ободников В. И. СВЧ нагрев как метод термообработки полупроводников // Письма в ЖТФ. — 1981. — Т. 7, Вып. 20. — С. 1221–1223

5. Винник Е. В., Гуров В. И., Прохорович А. В., Шевельев М. В. Использование мощного СВЧ-излучения для быстрого отжига арсенида галлия // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. — 1989. — Вып. 15. — С. 48–50.

6. Крыштаб Т. Г., Семенова Г. Н., Литвин П. М. и др. Немонотонность процессов структурной релаксации при СВЧ-обработке арсенида галлия // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. — 1996. — Вып. 31. — С. 140–145.

7. Yao-Jen Lee, Ta-Chun Cho, Shang-Shiun Chuang et al. Low-temperature microwave annealing processes for future IC fabrication — a review // IEEE Transactions on electron devices. — 2014. — Vol. 61, N 3. — P. 651–665.

8. Atanassova E. D., Belyaev A. E., Konakova R. V. et al. Effect of active actions on the properties of semiconductor materials and structures. — Kharkiv : NTC “Institute for Single Crystals”, 2007.

9. Soltani M., Certier M., Evrard R., Kartheuser E. Photoluminescence of CdTe doped with arsenic and antimony acceptors // J. Appl. Phys. — 1995. — Vol. 78, N 9. — P. 5626–5632.

10. Корбутяк Д. В., Лоцько А. П., Вахняк Н. Д. и др. Влияние СВЧ-облучения на фотолуминесценцию связанных экситонов в монокристаллах CdTe:Cl // ФТП. — 2011. — Т. 45, вып. 9. — С. 1175–1181.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 15.05 2014 г.*

*С. І. БУДЗУЛЯК, Д. В. КОРБУТЯК, О. П. ЛОЦЬКО, Н. Д. ВАХНЯК, С. М. КАЛИТЧУК,
Л. А. ДЕМЧИНА, Р. В. КОНАКОВА, В. В. ШИНКАРЕНКО, А. В. МЕЛЬНИЧУК**

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України;

*Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя

E-mail: kdv45@isp.kiev.ua, shynkarenko@isp.kiev.ua

ОСОБЛИВОСТИ ТРАНСФОРМАЦІЇ ДОМІШКОВО-ДЕФЕКТНОГО КОМПЛЕКСУ В CdTe:Cl ПІД ДІЄЮ НВЧ-ОПРОМІНЕННЯ

Методом низькотемпературної фотолумінесценції досліджено вплив мікрохвильового випромінювання на трансформацію домішково-дефектних комплексів в монокристалах CdTe:Cl. Показано, що активовані мікрохвильовим опроміненням тривалістю 10 с донорні центри Cl_{Te} і акцепторні центри V_{Cd}, наявні в зразках, створюють ефективні умови для формування дефектних центрів (V_{Cd} – Cl_{Te}), на яких зв'язуються екситони. Детальні дослідження форми смуги донорно-акцепторних пар монокристалів CdTe:Cl дозволили визначити параметр електрон-фононної взаємодії (фактор Хуанга–Рис) в залежності від часу опромінення.

Ключові слова: телурид кадмію, фотолумінесценція, мікрохвильове випромінювання.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2.45
UDC 53.097, 535.241.5

S. I. BUDZULYAK, D. V. KORBUTYAK, A. P. LOTS'KO,
N. D. VAKHNYAK, S. M. KALITCHUK, L. A. DEMCHINA,
R. V. KONAKOVA, V. V. SHYNKARENKO, A. V. MEL'NICHUK*

Ukraine, Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS;
*Nikolai Gogol Nezhtinskii State University

E-mail: kdv45@isp.kiev.ua, shynkarenko@isp.kiev.ua

FEATURES OF TRANSFORMATION OF IMPURITY-DEFECT COMPLEXES IN CdTe:Cl UNDER THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION

High-resistance cadmium telluride single crystals are promising material for production of ionizing radiation detectors. To increase crystal resistance, they are doped with chlorine. The detector quality depends on uniformity of chlorine impurity distribution over crystal.

It is known that low-dose microwave irradiation can homogenize impurity distribution in a specimen. In the present work, we made an attempt to improve the detector material quality by using such post-technological treatment, as well as to study state variation for impurity-defect complexes. To this end, the effect of microwave irradiation on transformation of impurity-defect complexes in CdTe:Cl single crystals was investigated using low-temperature photoluminescence. It is shown that activation of Cl_{Te} donor centers by microwave irradiation for 10 s and presence of V_{Cd} acceptor centers in the specimens under investigation effectively facilitate formation of $(V_{Cd}-Cl_{Te})$ defect centers at which excitons are bound.

Detailed investigations of the band form for donor-acceptor pairs (DAPs) in CdTe:Cl single crystals made it possible to determine the Huang–Rhys factor (that characterizes electron-phonon interaction in CdTe:Cl DAPs) as a function of microwave treatment duration. It is shown for single crystals with $N_{Cl} = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ and $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ that the Huang–Rhys factor grows with microwave irradiation dose. This is related to both homogenization of donor and acceptor centers distribution and increase of donor–acceptor spacing. It is shown that microwave irradiation of CdTe:Cl single crystals results in concentration reduction for separate cadmium vacancies V_{Cd} because of formation of $(V_{Cd}-Cl_{Te})$ defect centers at which excitons are bound.

Keywords: cadmium telluride, photoluminescence, microwave radiation.

REFERENCES

1. Korbutyak D. V., Mel'nichuk S. V., Korbut Ye. V., Borisjuk M.M. [Cadmium Telluride: impurity-defect states and detector properties]. Kiev, Ivan Fedorov, 2000, 198 p.
2. Kul'chitskii N. A., Naumov A. V. *Tsvetnaya metallurgiya*, 2010, no 2, pp. 31-44. (in Russian)
3. Stefano Del Sordo, Leonardo Abbene, Ezio Caroli, Anna Maria Mancini, Andrea Zappettini, Pietro Ubertini. (Review) Progress in the development of CdTe and CdZnTe semiconductor radiation detectors for astrophysical and medical applications. *Sensors*, 2009, vol. 9, pp. 3491-3526. DOI:10.3390/s90503491
4. Rzhzanov A. V., Gerasimenko N. N., Vasil'ev S. V., Obodnikov V. I. *Pis'ma v ZhTF*, 1981, vol. 7, iss. 20, pp. 1221-1223. (in Russian)
5. Vinnik E. V., Guroshv V. I., Prokhorovich A. V., Shevel'ev M. V. *Optoelektronika i poluprovodnikovaya tekhnika*, 1989, iss. 15, pp. 48-50. (in Russian)
6. Kryshchab T. G., Semenova G. N., Litvin P. M., Konakova R. V., Prokopenko I. V., Mazin M. A. *Optoelektronika i poluprovodnikovaya tekhnika*, 1996, iss. 31, pp. 140-145. (in Russian)
7. Yao-Jen Lee, Ta-Chun Cho, Shang-Shiun Chuang, Fu-Kuo Hsueh, Yu-Lun Lu, Po-Jung Sung, Hsiu-Chih Chen, Michael I. Current, Tseung-Yuen Tseng, Tien-Sheng Chao, Chenming Hu, Fu-Liang Yang. Low-temperature microwave annealing processes for future IC fabrication – a review. *IEEE Transactions on electron devices*, 2014, vol. 61, no 3, pp. 651-665.
8. Atanassova E. D., Belyaev A. E., Konakova R. V., Lytvyn P. M., Milenin V. V., Mitin V. F., Shynkarenko V. V. *Effect of active actions on the properties of semiconductor materials and structures*. Kharkiv, NTC "Institute for Single Crystals", 2007, 216 p.
9. Soltani M., Certier M., Evrard R., Kartheuser E. Photoluminescence of CdTe doped with arsenic and antimony acceptors. *J. Appl. Phys*, 1995, vol. 78, no 9, pp. 5626-5632.
10. Korbutyak D. V., Lotsko A. P., Vakhnyak N. D., Demchuna L. A., Konakova R. V., Milenin V. V., Red'ko R. A. Effect of microwave irradiation on the photoluminescence of bound excitons in CdTe:Cl single crystals. *Semiconductors*, 2011, vol. 49, iss. 9, pp. 1133-1139. DOI: 10.1134/S1063782611090119

Д. ф.-м. н. А. С. ГАРКАВЕНКО¹, д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ²,
к. т. н. О. В. БАНЗАК³, к. т. н. В. А. ЗАВАДСКИЙ⁴

¹Германия, г. Корнвестхайм, Фирма «Гайстескрафт»;

Украина, ²Одесский национальный политехнический университет; ³Одесская национальная академия связи имени А.С. Попова; ⁴Одесская национальная морская академия

E-mail: garks@arcor.de; mokrickiy@mail.ru

ИОНИЗАЦИОННЫЙ ОТЖИГ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ. ЧАСТЬ ПЕРВАЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

При облучении полупроводниковых кристаллов мощными (сильноточными) импульсными электронными пучками высоких энергий получен новый вид отжига, названный авторами «ионизационным», дано его теоретическое обоснование.

Ключевые слова: лазер, отжиг, электронный пучок.

Ранее в исследованиях влияния облучения на основные характеристики полупроводниковых лазеров с накачкой электронным пучком было обнаружено, что при облучении полупроводниковых кристаллов мощными (сильноточными) импульсными электронными пучками высоких энергий улучшаются структурные свойства образцов, т. е. происходит отжиг их дефектов [1, 2]. Однако, поскольку основное внимание в этих работах было уделено исследованию лазерных характеристик, исчерпывающего объяснения обнаруженному эффекту дано не было. В настоящей работе проведены исследования (теоретическое в первой части и экспериментальное во второй), позволившие выяснить физическую суть данного явления и получить новые результаты при использовании более коротких и мощных пучков электронов с более высокой энергией. В нашем случае под их воздействием отжиг кристаллов происходил не через несколько часов или суток, как в [1, 2], а непосредственно после окончания облучения. Этот эффект авторы предлагают называть «ионизационным отжигом» [3–5].

При возбуждении полупроводникового кристалла сильноточным импульсным электронным пучком с энергией выше порога генерации дефектов ($E_0 \geq 0,3 - 1$ МэВ при плотности тока пучка электронов $j = 15 - 300$ А/см² и длительности импульса $t = 0,1 - 10$ нс) в нем происходят процессы генерации, во-первых, неравновесной электронно-дырочной плазмы высокой плотности и, во-вторых, неравновесных дефектов, а именно пар Френкеля, состоящих из внедренного в междоузлие атома и вакансии. Рассмотрим первый процесс.

При облучении полупроводникового образца быстрые электроны, проникая в кристалл на глубину x , ионизируют на своем пути атомы решетки. Величина ионизационных потерь $-dE/dx$ была вычислена Г. Бете [6], однако полученная

им формула слишком громоздка, поэтому для аппроксимации распределения плотности потерь энергии электронов на ионизацию воспользуемся более удобной формулой [7, с. 202]

$$-\frac{dE}{dx} = A(E_0) \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{b^2}\right), \quad (1)$$

где E_0 — начальная кинетическая энергия электронов;

$A(E_0)$ — нормировочный множитель;

a, b — эмпирические константы.

Нормировочный множитель A выбирается таким, чтобы максимальное значение $-dE/dx$, проходящееся на точку $x = a$, было равно единице. Параметр b был найден из сравнения кривой, описанной формулой (1), с экспериментальными кривыми. Возникшие в результате ионизации первичные электроны имеют энергию, достаточную для того, чтобы ионизировать новые атомы и выбить из них вторичные электроны и т. д. Развивается лавинообразный процесс, приводящий к появлению в кристалле большой концентрации неравновесной горячей электронно-дырочной плазмы. Глубина проникновения электронов в кристалл увеличивается с ростом E_0 . В таблице приведены данные, полученные для кристалла CdS.

Значения параметров из формулы (1), полученные для кристалла CdS

E_0 , кэВ	A , кэВ/мкм	a , мкм	b , мкм	x , мкм
30	11,19	0,785	1,42	1,97
50	7,62	1,920	3,38	4,73
70	6,32	3,510	5,49	7,95
100	5,10	5,470	10,3	14,10
200	3,31	19,100	31,3	44,70
300	2,76	33,500	57,9	81,40

Пространственно-временное распределение такой неравновесной плазмы можно найти из уравнения типа Фоккера—Планка. При этом если электроны и дырки создаются накачиванием энергии, имеет место соотношение $n = p = \Delta N$, где n и p — концентрация электронов и дырок соответственно. В этом случае:

$$\frac{\partial \Delta N}{\partial t} = g - \frac{\Delta N}{\tau} + D \nabla^2 (\Delta N), \quad (2)$$

где ΔN — пространственно-временное распределение неравновесной электронно-дырочной плазмы;

τ, g — время жизни свободных носителей заряда и скорость их генерации;

D — коэффициент амбиполярной диффузии, $D = D_e D_h / (D_e + D_h)$;

D_e, D_h — коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно.

Поскольку $D_e \gg D_h$, имеем $D = D_h$. Уравнение Фоккера—Планка, как феноменологическое, формально применимо к сколь угодно плотной электронно-дырочной плазме. Если внешний электронный пучок, возбуждающий полупроводниковый кристалл, направлен вдоль оси $0x$, то уравнение (2) переписывается в виде

$$\frac{\partial \Delta N(x, t)}{\partial t} = g(x, t) - \frac{\Delta N(x, t)}{\tau} + D \nabla^2 (\Delta N(x, t)). \quad (3)$$

Будем решать одномерную задачу в предположении, что время жизни носителей заряда не зависит от ΔN . В стационарном случае (3) переходит к виду

$$D \frac{d^2 \Delta N(x)}{dx^2} - \frac{\Delta N(x)}{\tau} + g(x) = 0$$

или

$$\frac{d^2 \Delta N(x)}{dx^2} - \frac{\Delta N(x)}{L^2} = -\frac{g(x)}{D}, \quad (4)$$

L — диффузионная длина, $L = (D\tau)^{1/2}$.

Входящая в формулу (4) объемная скорость генерации пар $g(x)$ вычисляется как

$$g(x) = g(0) \cdot \exp \frac{-(x-a)^2}{b^2},$$

где $g(0) = j \cdot A(E_0) / (3eE_g)$;

e — заряд электрона;

E_g — ширина запрещенной зоны.

Обычно уравнение (4) решается при условии, что процесс генерации уже закончен и $g = 0$. Рассмотрим решение этого уравнения при $g \neq 0$, т. е. в процессе возбуждения кристалла.

Распределение концентрации неравновесных носителей имеет вид

$$\Delta N(x) = C_1 \exp(-x/L) + C_2 \exp(x/L) - \Gamma, \quad (5)$$

$$\text{где } \Gamma = \frac{g(0) \exp \frac{-(x-a)^2}{b^2}}{D \left(\frac{4a^2}{b^4} - \frac{2}{b^2} - \frac{1}{L^2} \right)}.$$

Поскольку концентрация неравновесных носителей уменьшается по мере удаления от области их инжекции, а не наоборот, коэффициент C_2 можно положить равным нулю, а C_1 определить из следующего граничного условия: при $x = 0$ $\Delta N(x) = \Delta N(0) = \tau j \cdot A(E_0) / (3eE_g)$. При этом учтено, что при таких высоких уровнях возбуждения все поверхностные уровни насыщаются. Таким образом, получим

$$\Delta N(x) = g(0) \cdot \exp(-x/L) \times \left[\tau + \frac{\exp(-a^2/b^2)}{\Lambda} \right] - \Gamma, \quad (6)$$

$$\text{где } \Lambda = D \left(\frac{4a^2}{b^4} - \frac{2}{b^2} - \frac{1}{L^2} \right).$$

С учетом того, что $\frac{4a^2}{b^4} - \frac{2}{b^2} \ll \frac{1}{L^2}$ и $L^2 = D\tau$, формула (6) преобразуется к виду

$$\Delta N(x) = g(0) \cdot \tau \left[\exp \frac{-x}{L} \left(1 - \exp \frac{-a^2}{b^2} \right) + \exp \frac{-(x-a)^2}{b^2} \right]. \quad (7)$$

При больших значениях энергии электронного пучка глубина проникновения электронов в кристалл довольно значительна. Например, в CdS при $E_0 = 300$ кэВ она составляет 81,4 мкм (см. таблицу), а диффузионная длина $L \approx 1$ мкм (член в круглых скобках в (7) дает примерно 0,33). Поэтому, пренебрегая первым членом в квадратных скобках, окончательно получим выражение

$$\Delta N(x) = g(0) \cdot \tau \cdot \exp \frac{-(x-a)^2}{b^2} = g(x) \cdot \tau. \quad (8)$$

Этот результат совпадает с решением, полученным на основе несколько иных соображений авторами [7]. Решение нестационарного уравнения (3) отличается от (8) наличием временного множителя:

$$\Delta N(x, t) = g(x) \cdot \tau [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (9)$$

Таким образом, получены пространственное и пространственно-временное распределения неравновесной электронно-дырочной плазмы, образующейся в процессе возбуждения полупроводникового кристалла. Из формул (8) и (9) видно, что эти распределения неоднородны в пространстве и во времени.

В данном случае рассматривается неравновесная электронно-дырочная плазма высокой плотности ($\Delta N = 10^{19} - 10^{22}$ см⁻³, среднее расстояние между частицами $r_0 = 10^{-6} - 10^{-8}$ см). При таких концентрациях она вырождена (например, для GaAs, CdS и других полупроводников) и представляет собой слабонеидеальную плазму, когда кинетическая энергия ее частиц имеет порядок энергии Ферми и намного превышает потенциальную энергию их взаимодействия, равную $e^2/(r_0 \epsilon_1)$, где ϵ_1 — действительная часть диэлек-

трической проницаемости. Таким образом, кинетическая энергия играет определяющую роль, обменная энергия Хартри — Фока при этом является уже малой поправкой, а корреляционная энергия вносит еще меньший вклад [8, с. 210]. Это означает, что при очень высокой плотности системы ферми-частиц ведут себя подобно идеальным газам [9]. Это необходимо учитывать в тех случаях, когда неравновесная электронно-дырочная плазма будет находиться в полностью термализованном состоянии.

Как следует из проведенного в [5, с. 21] анализа, электронно-электронное и дырочно-дырочное рассеяние не вносят никакого вклада в энергообмен, поскольку их энергия при межэлектронных и междырочных столкновениях не меняется и интегралы столкновений равны нулю, так что доминирующим становится электронно-дырочное рассеяние. Для количественного описания взаимодействия неравновесной электронно-дырочной плазмы с решеткой кристалла воспользуемся формулой полной диэлектрической проницаемости кубического кристалла $\epsilon(\omega)$. Соответствующее дисперсионное соотношение имеет вид [10, с. 81] $\epsilon(\omega) = 0$ или

$$\left(\epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}) \omega_t^2}{\omega^2 - \omega_t^2} \right) \left(1 - \frac{4\pi e^2 \Delta N}{\epsilon_{\infty} m_e \omega^2} \right) + \epsilon_{\infty} \frac{(\omega_l^2 - \omega_t^2)}{\omega^2 - \omega_l^2} \frac{\omega_p^2}{\omega^2} = 0, \quad (10)$$

где ϵ_{∞} , ϵ_0 — соответственно, высокочастотная и низкочастотная диэлектрические проницаемости кристалла;

ω_t , ω_l — частота поперечного и продольного оптических фононов соответственно;

ω_p — плазменная частота,

$\omega_p = [4\pi e^2 \Delta N / (\epsilon_{\infty} m_e)]^{1/2}$;

m_e — эффективная масса электрона.

Решая уравнение (10) относительно ω , получим следующее выражение:

$$\omega_{1,2}^2 = 0,5(\omega_l^2 + \omega_p^2) \pm 0,5[(\omega_l^2 + \omega_p^2)^2 - 4\omega_t^2 \omega_p^2]^{1/2}. \quad (11)$$

При плотности плазмы $\Delta N = 10^{19} - 10^{22} \text{ см}^{-3}$ справедливы неравенства $\omega_p \gg \omega_t$ и $\omega_p \gg \omega_l$, и тогда (11) преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega_{1,2}^2 &= 0,5\omega_p^2 \pm 0,5(\omega_p^4 - 4\omega_t^2 \omega_p^2)^{1/2} = \\ &= 0,5\omega_p^2 \pm 0,5\omega_p(\omega_p^2 - 4\omega_t^2)^{1/2} = \\ &= 0,5\omega_p^2 \pm 0,5\omega_p^2 = 0,5(\omega_p^2 \pm \omega_p^2). \end{aligned} \quad (12)$$

Отсюда можем записать решения:

$$\omega_1^2 = \omega_p^2, \quad (13)$$

$$\omega_2^2 = 0. \quad (14)$$

Известно, что плазма приводит к изменению частоты колебаний кристаллической решетки и, как видно из (13), (14), при таких больших значениях ΔN фононные частоты практически пода-

вляются, т. е. ими можно пренебречь по сравнению с плазменной частотой ω_p . При высоких уровнях возбуждения все донорные и акцепторные уровни насыщаются, поэтому рассеянием на заряженных примесях также можно пренебречь.

Инжектированные свободные носители экранируют химические связи атомов кристалла. Простейший способ описания этого явления основан на учете только статического плазменного экранирования электростатического взаимодействия, когда кулоновский потенциал атома кристалла $V(r) = Ze/(\epsilon_0 r)$ заменяется на потенциал Юкавы, соответствующий короткодействующим силам:

$$V(r) = \frac{Ze}{\epsilon_0 r} \exp \frac{-r}{r_{TF}}, \quad (15)$$

где Z — заряд ядра;

r — среднее расстояние между частицами;

r_{TF} — радиус экранирования Томаса — Ферми.

В интересующем нас случае, когда неравновесные носители вырождены, имеем

$$r_{TF} = \left(\frac{2E_F}{3e^2 \Delta N} \right)^{1/2}. \quad (16)$$

На малых расстояниях r (при $T = 300 \text{ К}$), сравнимых со средней длиной волны де Бройля для экранирующих зарядов, где существенно сказываются квантовые эффекты, потенциал (15) стремится к асимптотическому виду:

$$V(r) = \frac{Ze}{\epsilon_0 r} \exp(-\beta r) \cos \beta r, \quad (17)$$

где $\beta = 1/r_{TF}$.

Как видно из формулы (16), радиус экранирования r_{TF} с увеличением концентрации неравновесных носителей ΔN уменьшается. При достижении достаточно малых его значений ($r_{TF} \approx 10^{-8} \text{ см}$), соизмеримых с радиусом первой боровской орбиты, т. е. $r_{TF} \approx a_B = \hbar^2 / (m_e e^2)$, локальные электронные состояния могут вообще исчезнуть ($\hbar$ — постоянная Планка). В этом случае атомы кристалла и точечные дефекты неизбежно ионизируются.

Для оценки критической концентрации неравновесных носителей заряда $\Delta N_{кр}$, когда химические связи полностью экранируются и происходит обусловленное ионизацией исчезновение локальных уровней, необходимо решить следующее уравнение Шредингера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 \psi - \frac{e^2}{\epsilon_0 r} \exp(-\beta r) \cos \beta r \cdot \psi = E \psi, \quad (18)$$

где собственные значения энергии E отсчитываются от дна зоны проводимости и, следовательно, абсолютное значение энергии низшего уровня $|E_{\min}| = E_I$ есть непосредственно энергия ионизации.

Численное решение уравнения (18) дает искомого критическое значение концентрации $\Delta N_{кр}$,

при которой энергия ионизации обращается в нуль:

$$\Delta N_{\text{кр}} = 0,27 \left(\frac{m_e e^2}{\hbar^2 \epsilon_0} \right)^3 = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}. \quad (19)$$

Значение $\Delta N_{\text{кр}}$ такого порядка соответствует тем концентрациям электронно-дырочной плазмы, которые используются нами в эксперименте. Когда частота плазмы такова, что $\omega_p \gg k v_F^{e,h}$, экранирование становится также и динамическим [8, с. 41] (здесь k и $v_F^{e,h}$ — волновое число и скорость носителей на поверхности Ферми соответственно). При $E_0 = 15,2$ МэВ, $j = 150$ А/см², $\Delta N = 2,2 \cdot 10^{21}$ см⁻³ радиус Томаса — Ферми составляет примерно 10^{-8} см, при этом наступает полное экранирование химических связей. При такой плотности плазмы происходит ее сжатие и, соответственно, возрастание энергии Ферми, а также увеличение давления и связанная с этим ионизация атомов кристалла. При $T = 300$ К и $\Delta N \approx 10^{19}$ см⁻³ давление достигает порядка $21,5 \cdot 10^5$ Н/см², что соответствует 21,3 атм [11, с. 71]. При этом термализованная электронно-дырочная плазма рассматривается как идеальный газ.

Итак, в области облучения образца мощным электронным пучком все уровни энергии связанных состояний вследствие экранирования и ионизации практически полностью исчезают. Это резко увеличивает подвижность атомов кристалла и скорость их диффузии. Неоднородный характер возбуждения полупроводника электронным пучком по глубине кристалла, о котором упоминалось выше, способствует возникновению градиента концентрации, приводящего к возникновению силы, способствующей смещению атомов кристалла в междоузлия и «залечиванию» кристаллической решетки, увеличению ее однородности.

Рассмотрим второй процесс — релаксацию энергии и импульса горячей электронно-дырочной плазмы за счет упругого электронно-дырочного рассеяния между собой и неупругого рассеяния электронов и дырок на равновесных и неравновесных дефектах Френкеля (при энергии и токе возбуждающего электронного пучка, больших порога генерации дефектов: $E_0 \geq 0,3 - 1$ МэВ, $j = 15 - 300$ А/см², $t = 0,1 - 10$ нс). При этом процессы рассеяния неравновесной плазмы на дефектах и процессы экранирования их термализованной плазмой происходят практически одновременно (время релаксации импульса — порядка 10^{-14} с, энергии — $\tau_E \approx 10^{-12}$ с).

Максимальная энергия E_{max} , которую ускоренный электрон с кинетической энергией E_0 передает атому кристалла при столкновении, равна [12, с. 52]

$$E_{\text{max}} = 4mME_0/(m+M)^2, \quad (20)$$

где m , M — соответственно, значения массы электрона и атома кристалла.

Первично выбитый атом с энергией E_{max} порождает множество других выбитых атомов, которые в свою очередь способны порождать так называемый каскад вторичных смещений [12]. Полное число неравновесных дефектов Френкеля в 1 см³ кристалла будет равно

$$N_d = \nu N, \quad (21)$$

где ν — среднее число столкновений первично выбитого из узла атома с другими атомами кристалла [5, с. 29; 13, с. 101];

N — число первично выбитых атомов, образовавшихся в единичном объеме.

При этом

$$\nu = \frac{E_{\text{max}}}{2E_d} f; \quad (22)$$

$$N = \Phi N_A \sigma, \quad (23)$$

где E_d — пороговая энергия, т. е. минимальная энергия, которую нужно передать атому кристалла, чтобы он перешел в междоузельное положение;

f — фактор, учитывающий анизотропию рассеяния;

Φ — интегральный поток (доза) электронов;

N_A — число Авогадро;

σ — поперечное сечение столкновений, смещающих атомы.

Поскольку рассматриваемые дефекты Френкеля являются неравновесными, можно считать, что в объеме облучаемого кристалла накапливается большая запас связанной с ними потенциальной энергии. Энергия 1 см³ облученного электронами кристалла больше энергии 1 см³ необлученного кристалла на величину

$$E(N_d) = N_d E_d. \quad (24)$$

Оценим величину $E(N_d)$ для GaAs. Типичное значение E_{max} при облучении электронами с $E_0 = 1$ МэВ для Ga равно 30 эВ, а для As — 29 эВ. Положим $f = 2$, $E_d = 10$ эВ, $\Phi = 10^{18}$ электрон/см², $N_A = 10^{22}$ см⁻³, $\sigma = 10^{-22}$ см². Тогда $\nu_{\text{Ga}} = 3$, $\nu_{\text{As}} = 2,9 \approx 3$, $N = 10^{18}$ см⁻³, $N_d = 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³, $E(N_d) = 3 \cdot 10^{19}$ эВ·см⁻³. Примерно такого же порядка значения величин получаются и для CdS. Таким образом, в неравновесных дефектах Френкеля в облученном полупроводнике может быть накоплена значительная энергия.

Одновременно с генерацией неравновесных дефектов происходит генерация электронно-дырочной плазмы высокой плотности, которая рассеивается на этих дефектах. В целом, рассеяние неравновесных носителей заряда на уже существующих в кристалле и порождаемых в течение импульса облучения пучком быстрых электронов дефектах Френкеля является неупругим, поскольку в процессе отдельного столкновения дефекту передается средняя энергия

$$\Delta E = (E_0/t) \tau_E. \quad (25)$$

Таким образом, при $E_0=1$ МэВ, $t=1$ нс и $\tau_E \approx 10^{-12}$ с дефекту передается средняя энергия порядка 10^3 эВ, т. е. 1 кэВ.

Чем чаще происходят столкновения неравновесных носителей с дефектами решетки, тем больше энергии получают дефекты и тем быстрее они отжигаются. Следует отметить, что при таком эффективном отжиге неравновесные дефекты Френкеля будут рекомбинировать с выделением запасенной при облучении энергии $E(N_d)$. При этом процессы «залечивания» дефектов будут происходить значительно быстрее, т. к. из-за сильного экранирования, как уже отмечалось выше, подвижность атомов (ионов) значительно увеличивается. В таком случае в течение импульса кристалл полностью отжигается и его электрофизические и оптические свойства существенно улучшаются.

Таким образом, междоузельные атомы и вакансии возникают при облучении интенсивным импульсным электронным пучком в одинаковом количестве и исчезают («залечиваются») путем взаимной рекомбинации при отжиге в течение импульса облучения благодаря взаимодействию с электронно-дырочной плазмой высокой плотности. При этом образец практически не нагревается, поэтому такой отжиг назван ионизационным.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Богданкевич О.В., Вавилов В.С., Данилычев В.А. и др. Влияние облучения на основные характеристики полупроводникового квантового генератора из арсенида галлия, возбуждаемого электронным пучком // Препринт № 127. — ФИАН. — Москва, 1969.
2. Богданкевич О.В., Борисов Н.А., Календин В.В. и др. Кинетика восстановления люминесцентных свойств монокристаллов GaAs, облученных интенсивным пучком электронов // Квантовая электроника. — 1972. — № 11. — С. 108 — 110.
3. Гаркавенко О.С., Мокрицкий В.А., Ленков С.В., Банзак О.В., Завадский В.А. Радиационный відпал лазерних кристалів CdS // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Лазерні технології. Лазери та їх застосування». — 2011. — Україна, Трускавець. — С. 54.
4. Мокрицкий В.А., Ленков С.В., Гаркавенко О.С. та ін. Аналіз механізмів відпалу лазерних кристалів CdS // 36. наук. праць ВІКНУ імені Тараса Шевченка. — 2011. — Вип. № 33. — С. 96 — 98.
5. Гаркавенко А.С. Радиационная модификация физических свойств широкозонных полупроводников и создание на их основе лазеров большой мощности. — Львов: ЗУКЦ, 2012.
6. Bethe H. The influence of screening on the creation and stopping of electrons // Proc. Cambr. Phil. Soc. — 1934. — Vol. 30. — P. 524.
7. Богданкевич О.В., Дарзбек С.А., Елисеев П.Г. Полупроводниковые лазеры. — Москва: Наука, 1976.
8. Пайнс Д., Нозьер Ф. Теория квантовых жидкостей. — Москва: Мир, 1967.
9. Крефт В.-Д., Кремпл Д., Эбелинг В., Репке Г. Квантовая статистика систем заряженных частиц. — Москва: Мир, 1988.
10. Владимиров В.В., Волков А.Ф., Мейлихов Е.З. Плазма полупроводников. — Москва: Атомиздат, 1979.
11. Шиллинг Г. Статистическая физика в примерах. — Москва: Мир, 1976.
12. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. — Москва: Наука, 1988.
13. Ленков С.В., Мокрицкий В.А., Гаркавенко А.С. и др. Радиационное управление свойствами материалов и изделий опто- и микроэлектроники. — Одесса: Друк, 2003.
14. Экспериментальная ядерная физика. Т.1 / Под ред. Э. Сегре. — Москва: ИЛ, 1955.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 25.12 2013 г.*

*Д. ф.-м. н. О. С. ГАРКАВЕНКО¹, д. т. н. В. А. МОКРИЦЬКИЙ²,
к. т. н. О. В. БАНЗАК³, к. т. н. В. О. ЗАВАДСЬКИЙ⁴*

¹Німеччина, г. Корнвестхайм, Фірма «Гайстескрафт»;

²Україна, Одеський національний політехнічний університет;

³Одеська національна академія ім. О. С. Попова;

⁴Одеська національна морська академія

E-mail: garks@arcor.de; mokrickiy@mail.ru

ІОНІЗАЦІЙНИЙ ВІДПАЛ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ. ЧАСТИНА ПЕРША: ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ

При опроміненні напівпровідникових кристалів потужними (сильнострумовими) імпульсними електронними пучками високих енергій отримано новий вид відпалу, названий авторами «іонізаційним», надано його теоретичне обґрунтування.

Ключові слова: лазер, відпал, електронний пучок.

DOI: 10.15222/TKEA2014.4.50
UDC 535.14:621.365.826

A. S. GARKAVENKO¹, V. A. MOKRITSKII²,
O. V. BANZAK², V. A. ZAVADSKII²

Germany, Kornwestheim, Wissenschaftliche Vereinigung "Geisteskraft";
Ukraine, Odessa National Polytechnic University;
A. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications;
Odessa National Maritime Academy

E-mail: garks@arcor.de; mokrickiy@mail.ru

IONIZATION ANNEALING OF SEMICONDUCTOR CRYSTALS. PART ONE: THEORETICAL BACKGROUND

During irradiation of semiconductor crystals with powerful (high current) pulsed high-energy electron beams, a new type of annealing has been obtained. We could obtain new results and to find out physical nature of this phenomenon due to short and powerful bunches of electrons with high energy. Given its theoretical justification, the new annealing type has been called the "ionization annealing".

Keywords: laser, annealing, electron beam.

REFERENCES

1. Bogdankevich O.V., Vavilov V.S., Danilychev V.A., V.V. Alendin, Kryukova I.V. [Irradiation effect on the basic characteristics of semiconductor lasers made of gallium arsenide excited by an electron beam]. No 127, ASC LPI, Moscow, 1969. (in Russian, unpublished)
2. Bogdankevich O.V., Borisov N.A., Kalendin V.V., Kovsh I.B., Kryukova I.V. [Reduction kinetics of luminescence properties of single crystals of GaAs, irradiated by an intense beam of electrons]. Kvantovaya elektronika, 1972, no 11, pp. 108-110. (in Russian)
3. Garkavenko O.S., Mokritskii V.A., Lyenkov S.V., Banzak O.V., Zavads'kii V.A. [Laser radiation annealed CdS crystals]. Proc. of the confer. "Lazerni tekhnologiyi. Lazeri ta yikh zastosuvannya", Ukraine, Truskavec, 2011, p. 54. (in Ukrainian)
4. Mokritskii V.A., Lyenkov S.V., Garkavenko O.S., Zavads'kii V.A., Banzak O.V. [Analysis of the mechanisms of laser annealing CdS crystals] Collection of Scientific Papers of the Military Institute, Ukraine, Kiev, 2011, iss. 33, pp. 96-98. (in Ukrainian)
5. Garkavenko O.S. [Radiation modification of the physical properties of wide bandgap semiconductors and creation on their basis of high-power lasers]. Lviv, ZUKC, 2012, 258 p. (in Russian)
6. Bethe H. The influence of screening on the creation and stopping of electrons. Proc. Cambr. Phil. Soc., 1934, vol. 30, p. 524.
7. Bogdankevich O.V., Darznek S.A., Eliseev P.G. Poluprovodnikovye lazery [Semiconductor lasers]. Moscow, Nauka, 1976, 415 p. (in Russian)
8. Pains D., Noz'er F. Teoriya kvantovykh zhidkosti [The theory of quantum liquids]. Moscow, Mir, 1967, 382 p. (in Russian)
9. Kreft V.-D., Kremp D., Ebeling V., Repke G. Kvantovaya statistika sistem zaryazhennykh chastits [Quantum statistics of charged particles systems]. Moscow, Mir, 1988, 405 p. (in Russian)
10. Vladimirov V.V., Volkov A.F., Meilikhov E.Z. Plazma poluprovodnikov [Semiconductor plasma] Moscow, Atomizdat, 1979, 354 p. (in Russian)
11. Shilling G. Statisticheskaya fizika v primerakh [Statistical physics in the examples]. Moscow, Mir, 1976, 431 p. (in Russian)
12. Vavilov V.S., Kekelidze N.P., Smirnov L.S. Deistvie izlucheniya na poluprovodniki [Effect of radiation on semiconductors]. Moscow, Nauka, 1988, 173 p. (in Russian)
13. Lenkov S.V., Mokritskii V.A., Garkavenko A.S. et al. Radiatsionnoe upravlenie svoystvami materialov i izdelii opto- i mikroelektroniki [Radiation control properties of materials and products opto- and microelectronics]. Odessa, Druk, 2003, 345 p. (in Russian)
14. Segre E. (Ed.) Experimental nuclear physics. Vol. 1. John Wiley, 1953.

А. В. ВОРОБЬЕВ¹, к. т. н. В. Д. ЖОРА²

Россия, г. Красногорск, ¹НПП «Поликом»,
Украина, г. Киев, ²НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ

E-mail: vdzhora@ukrpost.net

ГИБКИЕ ФОЛЬГИРОВАННЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ: КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Приведена классификация гибких фольгированных диэлектриков различных типов, проведен их сравнительный анализ. Выделен наиболее перспективный вариант изготовления безадгезивных фольгированных диэлектриков на полиимидном основании, получаемых нанесением полиимидного лака на металлическую фольгу.

Ключевые слова: гибкие фольгированные диэлектрики, лакофольговые диэлектрики, полиимидное основание, полиимидный лак, металлическая фольга.

Область применения гибких фольгированных диэлектриков постоянно расширяется. Если еще 30—40 лет тому назад основными потребителями таких материалов были изготовители гибких печатных плат [1], то в настоящее время они широко используются при изготовлении RFID-антенн, различного типа меток для защиты товаров от краж, гибких печатных кабелей [2], гибких полиимидных носителей (ГПН) [3, 4], гибких терморезисторов [5], мембран акустических преобразователей [6] и даже фотоэлектрических преобразователей [2]. Трудно назвать современную область науки и техники, в которой не используются фольгированные диэлектрические материалы. Это, как и ранее, радиоэлектроника, приборостроение, а также электроника в авиации, космонавтике, ядерных исследованиях и даже в медицине.

Гибкие фольгированные диэлектрики различаются структурным строением, материалами диэлектрического основания, металлического проводящего слоя и адгезива (при его использовании) и поставляются в виде листов или в рулонах. Поскольку для изготовления фольгированных диэлектриков применяется, с одной стороны, широкий спектр материалов основания, как правило полимерных, а с другой — различные металлические слои, то их сочетания обуславливают большое разнообразие изготавливаемых фольгированных материалов. Некоторые из них, например диэлектрики, фольгированные медью, на полиэфирном или полиимидном основании, выпускаются многими зарубежными и отечественными предприятиями, и потребитель может выбирать наиболее приемлемый вариант по техническим характеристикам, качеству и цене. Другие, напротив, представлены на рынке всего лишь одним производителем. Важно также отметить, что не все виды материалов, несмотря

на их большое разнообразие, отвечают требованиям потребителей, поэтому существует необходимость разработки новых фольгированных диэлектриков, отвечающих современным требованиям рынка как по качеству, так и по номенклатуре.

Целью данной работы является сравнительный анализ существующих гибких фольгированных диэлектриков и выбор наиболее перспективных направлений их применения и совершенствования.

Классификация гибких фольгированных диэлектриков

По своему структурному строению фольгированные диэлектрики могут быть двухслойными (безадгезивные материалы), трехслойными, имеющими структуру «металл — адгезив — полимер», и многослойными [7].

Безадгезивные фольгированные диэлектрики

В настоящее время безадгезивные фольгированные диэлектрики изготавливаются несколькими методами:

- напылением металлического слоя на полимерную пленку [8];

- нанесением на металлическую фольгу жидкого лака с последующим превращением его в полимерную пленку (лакофольговые диэлектрики) [9];

- напылением металлического слоя с последующим электрохимическим осаждением на него более толстого основного проводящего слоя [2];

- методом химической металлизации с последующим электрохимическим осаждением слоя [2].

Безадгезивные фольгированные диэлектрики с напыленным металлическим слоем, чаще всего алюминиевым, используются для радиационной защиты в скафандрах, электромагнитно-

го экранирования и изготовления мембран акустических преобразователей [10].

Однако такие металлические пленки имеют сравнительно малую толщину, как правило около микрометра. Важно отметить, что напыление является сравнительно дорогой операцией и ее использование в технологическом процессе может существенно повысить стоимость изготавливаемых изделий. Относительно дорогим является также метод с использованием процессов химического и электрохимического осаждения.

Трехслойные фольгированные диэлектрики

В трехслойных фольгированных диэлектриках используются адгезивы для склеивания (дублирования) полимерной пленки с фольгой. Правильный выбор адгезива, его толщины и обеспечение равномерности нанесения определяют качество трехслойного диэлектрика. Так, при малой толщине адгезива ухудшается сцепление полимера с металлом, а при слишком большой — появляется вероятность образования гофр и изломов в слое металла, что приводит к ухудшению физико-механических свойств фольгированного диэлектрика, например к снижению устойчивости к многократным перегибам. Следует отметить сравнительно невысокую термостойкость адгезивов, что сказывается на общей термостойкости фольгированного диэлектрика и изготавливаемых из него изделий, особенно в случае когда в качестве основания используется полиимид. Также адгезивы оказывают отрицательное влияние на электрические характеристики фольгированных диэлектриков. Применяются адгезивы как в жидком виде, так и, чаще всего, в виде пленок. Их выбор достаточно широк — используются полиэфирные, акриловые, эпоксидные, полиимидные и ряд других склеивающих материалов [1].

Многослойные фольгированные диэлектрики

Многослойные фольгированные материалы также изготавливают методом дублирования, например, когда к полимерному основанию с помощью адгезивов с обеих сторон приклеивают металлическую фольгу. Такие материалы применяются при изготовлении многослойных печатных кабелей, а также для изготовления радиочастотных меток защиты товаров от краж.

Другой, комбинированный, метод предполагает изготовление вначале безадгезивного двухслойного диэлектрика, к которому в последующем приклеивается еще один слой металлической фольги.

Материалы диэлектрического основания

В качестве диэлектрического основания для фольгированных диэлектриков применяются самые различные полимерные материалы: полиэфир, в частности полиэтилентерефталат (он же Mylar или лавсан), полиимид [1, 2, 7] (Kapton различных типов), фторополимерные плен-

ки (Teflon), жидкокристаллические полимеры (LCP) и даже термопластичные пленки, такие, например, как полиэтилен, поливинилхлорид и др. Толщина полимерного основания гибких фольгированных диэлектриков меняется в широких пределах, чаще всего она составляет от 10 до 125 мкм. Более детальная сравнительная характеристика этих материалов приведена в [1].

В настоящее время наибольшей популярностью пользуются полиэфирные (Mylar) и полиимидные (Kapton) пленки. Они имеют хорошие электрические характеристики и достаточную прочность при разрыве. Полиэфирные пленки, кроме того, характеризуются сравнительно низкой стоимостью и низким влагопоглощением, однако являются горючими, плохо выдерживают пайку и становятся хрупкими при криогенных температурах.

Полиимидные пленки также способны поглощать влагу (до 3%), к тому же являются более дорогими в сравнении с полиэфирными. Однако они обладают ценнейшим комплексом свойств, такими как:

- малая плотность [11];
- высокая радиационная стойкость [11];
- высокая электрическая прочность [12];
- низкая диэлектрическая проницаемость [11, 12];
- сравнительно высокая в сравнении с другими полимерами теплопроводность [12];
- высокая механическая прочность в сочетании с эластичностью [12];
- близость температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) полиимида к значению ТКЛР металлов, применяемых для изготовления фольгированных диэлектриков (меди и, особенно, алюминия);
- способность поддаваться травлению в сильнощелочных растворах, что позволяет при необходимости получать в них сквозные отверстия [11, 12];
- незначительность газовыделения, что позволяет проводить вакуумное напыление различных металлов на полиимидные пленки и даже изготавливать многослойные гибкие платы [3, 4, 11, 13].

В ряду ароматических полиимидов наиболее ценным комплексом свойств обладает поли-4, 4'-дифенилокси-пиромеллитимид, получаемый по реакции поликонденсации пиромеллитового диангидрида и аминодифенилового эфира. Пленки из такого материала известны в России как ПМ1, ФДИ и др., а в США — как Kapton различных типов. Широкое применение этого конкретного материала обусловлено в первую очередь его исключительной способностью сохранять стабильность свойств при высокой температуре [12], что позволяет проводить операции термокомпрессии и эвтектической пайки кремния с золотом при температуре около 400°C [4].

*Технические характеристики пленок, используемых в качестве полимерного основания
фольгированных диэлектриков*

Тип полимера	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение при растяжении, %	Электрическая прочность, кВ/мм	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла потерь	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Диапазон рабочих температур, °С
Полиимид Kapton	175–180 [1, 2, 11, 12]	60 [1]	280–300 [12]	3,5 [1]	0,003 [1]	0,14–0,20*	–200... +300 и выше [2, 11, 12, 14]
Полиэфир Mylar	180 [1]	120 [1]	276 [1]	3,2 [1]	0,005 [1]	0,14*	–20... +100 [15]

* Данные производителей полимерных пленок

Сравнительные технические характеристики материалов, наиболее часто применяющихся в качестве полимерного основания фольгированных диэлектриков, приведены в **таблице**.

Материалы проводящего слоя

В качестве материала проводящего слоя используется преимущественно медная фольга, представленная на рынке в широком ассортименте. Так, например, американским стандартом IPC-4562 регламентируются восемь основных типов медной фольги, используемой при изготовлении гибких плат [1]. Из них четыре типа получают методом электрохимического осаждения (электролитическая фольга), а остальные — методом прокатки. Катаная фольга является более качественной и обеспечивает большую устойчивость к многократным перегибам. Но при ее использовании требуется обязательная подготовка поверхности основания для повышения ее шероховатости с целью улучшения адгезии между слоями. Медь можно также осаждать гальваническим путем на гибкое основание после его предварительной химической металлизации или после предварительного напыления на него тонкого медного слоя (обычно менее 1 мкм), в том числе с подслоем хрома, никеля и других металлов.

Следует отметить такой недостаток меди, как высокая окисляемость ее поверхности [4], создающая трудности при монтаже. В связи с этим медь в изделиях используется преимущественно в составе многослойных проводников, в которых предусматривается защита ее поверхности, например золотом или припоями, а также покрывными полимерными пленками с односторонне нанесенным слоем адгезива путем прикатки и прессования при высоких температурах.

В случае специальных требований всегда имеется широкий выбор фольги других металлов, в частности алюминия и никеля. Применяется также фольга из сплавов меди (бериллиевая бронза) и железа (нержавеющая сталь, сплав Iconel).

Появление таких изделий, как RFID-антенны, радиочастотные мягкие метки для защиты това-

ров от краж, гибкие печатные кабели, гибкие полиимидные носители обусловили необходимость выпуска гибких фольгированных диэлектриков с использованием не только медной, но и алюминиевой фольги, обеспечивающей снижение веса и стоимости изделий и имеющей ряд дополнительных преимуществ.

Важнейшим из них является совместимость выводов из алюминиевой фольги с кристаллами микросхем. Это обусловлено тем, что в качестве материала контактных областей кристаллов используется в основном алюминий. В таком случае при использовании алюминия в качестве проводящего слоя гибких носителей, шлейфов или антенн в местах соединения выводов с контактными областями кристаллов образуется однокомпонентная система Al—Al, в которой исключается появление хрупких интерметаллических соединений в твердой фазе при эксплуатации приборов, в том числе при повышенных температурах [7]. Другим важным преимуществом алюминия является то, что он имеет малый заряд ядра ($Z=13$), не образует при облучении вторичных изотопов и устойчив к воздействию радиации [7, 11]. Это актуально в случаях необходимости обеспечения работоспособности изделий в условиях радиационных нагрузок, а также при ядерных и космических исследованиях.

Важно отметить, что алюминиевая фольга, в отличие от медной, выпускается только катаной.

Состояние и перспективы производства гибких фольгированных диэлектриков в России и странах СНГ

Промышленность России и стран СНГ выпускает гибкие диэлектрики, изготовленные преимущественно из электролитической медной фольги и полиэтилентерефталатной или полиимидной пленки, соединенных между собой с помощью адгезива (ПФ,ДФГ,ЭФП и др.). Однако, поскольку качество таких материалов низкое, изготовить из них современные высоконадежные изделия, например военного назначения, невозможно [1]. Это обусловлено более низкой пластичностью электролитической мед-

ной фольги в сравнении с катаной, высокой степенью усадки диэлектрического основания изделий после стравливания фольги, недостаточной устойчивостью диэлектриков к воздействию расплавленного припоя из-за низкой термостойкости адгезивов, а также нестабильностью физических, механических и электрических характеристик материалов [1]. В связи с этим изготовители гибких печатных плат вынуждены использовать более качественные импортные материалы, применение которых, впрочем, запрещено действующим стандартом на платы печатные военного назначения (ГОСТ РВ 5998-002).

Производство гибких диэлектриков для нужд электронной техники с применением других видов металлической фольги, в частности из алюминия, в России свертывается в связи с недостаточным финансированием отраслевого института электронных материалов. Кроме того, постоянно возрастает потребность в новых материалах, особенно безадгезивных, выдерживающих воздействие более высоких температур и позволяющих существенно повысить плотность монтажа элементов [1], а существующий уровень производства не отвечает требованиям по качеству и номенклатуре.

Из безадгезивных фольгированных материалов в России в настоящее время выпускаются в основном диэлектрики лакофольговые типа ФДИ-АП50 и ФДИ-А220 на полиимидном основании с толщиной алюминиевой фольги 30 мкм и полиимидной пленки 20 мкм. Однако эти материалы являются нестабильными, т. к. степень полимеризации (имидизации) их основания низкая (до 70%), вследствие чего они имеют ограниченный гарантийный срок хранения (не более трех месяцев) и дают большую усадку в процессе изготовления изделий как после стравливания фольги, так и при проведении технологических операций термообработки. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что изделия, изготовленные из лакофольговых диэлектриков с пониженной степенью имидизации, требуют обязательной финишной термообработки при 300°C для полного завершения процесса имидизации. Поэтому при проектировании сложных многовыводных изделий, в частности гибких полиимидных носителей для сборки микросхем [3, 4, 7, 13], микрокабелей и шлейфов, из таких материалов необходимо учитывать поправку на усадку. С другой стороны, нестабильность свойств полиимидного основания этих изделий делает такую упреждающую корректировку недостаточно эффективной.

Постоянное повышение уровня интеграции микросхем, собираемых с использованием гибких полиимидных носителей и микрокабелей, сопровождается увеличением числа их выводов до нескольких сотен и диктует необходимость уменьшения шага выводов до 80 мкм [7], а ино-

гда до 50 мкм [16]. Изготовление таких сложных многовыводных изделий возможно только за счет существенного повышения качества и стабильности свойств лакофольговых диэлектриков, а также уменьшения толщины алюминиевой фольги до 14 мкм, а в некоторых случаях и до 10 мкм [16].

Появление на рынке акустических мембран [6], изготавливаемых НПП «Поликом» из лакофольговых диэлектриков типа «алюминий — полиимид», стало возможным благодаря расширению номенклатуры выпускаемых фольгированных материалов. В частности, для изготовления мембран необходим целый ряд лакофольговых диэлектриков с толщиной алюминиевой фольги 10, 14, 20, 25 и 30 мкм. Для производства гибких терморезисторов на полиимидной основе [5] выпускается безадгезивный материал типа «никель — полиимид» с толщиной металлической фольги 7 мкм. При изготовлении такого материала применяется катаная никелевая фольга.

Вопросы повышения качества гибких фольгированных диэлектриков и объемов их выпуска остаются актуальными.

Учет всех свойств, стоимостных показателей, особенностей изготовления и предложений на рынке фольгированных диэлектриков позволяет выделить в качестве, на наш взгляд, наиболее перспективных для производства безадгезивные лакофольговые диэлектрики, получаемые нанесением полиимидного лака на металлическую фольгу при полной имидизации, что позволит повысить качество и стабильность свойств материала. Для достижения этого очень важным является совершенствование технологии их изготовления. При этом гарантийный срок хранения материала увеличивается до одного года.

Используя такие лакофольговые диэлектрики можно:

- повысить плотность монтажа элементов изделий за счет уменьшения шага выводов до 80 мкм, а при необходимости и до 50 мкм [1, 7, 16];
- обеспечить широкую номенклатуру фольгированных диэлектриков за счет применения разнообразных как по толщине, так и по материалу (алюминий, медь, никель, их сплавы и пр.) видов фольги;
- обеспечить выпуск новых высокотехнологичных изделий.

Так, изготовленные из лакофольгового диэлектрика типа «алюминий — полиимид» гибкие полиимидные носители, микрокабели и шлейфы позволяют непосредственно присоединять полупроводниковые кристаллы к их выводам, и обеспечивают высокую надежность изделий за счет образования монометаллического соединения Al—Al при сварке на кристалле.

Благодаря же исключительно высокой радиационной стойкости полиимида и алюминия, обеспечивается возможность работы изделий в условиях радиационных нагрузок.

Технология изготовления лакофольговых диэлектриков

Технологический процесс изготовления безадгезивных фольгированных (лакофольговых) диэлектриков включает следующие основные операции [9]:

- подготовка поверхности фольги;
- формирование слоя полиимидной пленки на фольге;
- термообработка фольгированного диэлектрика.

Высокие качественные характеристики фольгированных диэлектриков, изготавливаемых по разработанной технологии, достигаются за счет:

- проведения очистки, обезжиривания фольги и обдува для улучшения адгезии к ней полиимидной пленки;
- предварительной фильтрации полиимидного лака с целью удаления примесей и пузырьков воздуха;
- обеспечения равномерной и одновременной температурной обработки всего рулона диэлектрика, намотанного совместно с лентой корректора, с целью гарантированной равномерности степени имидизации и отжига алюминия для улучшения его свариваемости;
- проведения термообработки в вакуумной камере или печи;
- доведения степени имидизации полиимидной пленки до 95—100%.

Авторами в НПП «Поликом» организован серийный выпуск ряда фольгированных диэлектриков (ФДИ-А24, ФДИ-А40 и др.) с разной толщиной фольги: алюминиевой — 10, 14, 20, 25 и 30 мкм, никелевой — 7 мкм (ЭФН-7), медной — 18, 35 и 50 мкм (ДЛ-ПМ). Данные материалы используются для изготовления гибких полиимидных носителей, шлейфов, микрокабелей, мембран акустических преобразователей, терморезисторов и других изделий.

Выводы

Таким образом, проведенный анализ показал, что в сравнении с другими фольгированными диэлектриками лакофольговые диэлектрики имеют существенное преимущество, поскольку изготавливаются без использования адгезивов. Разработанная технология позволяет осуществлять серийный выпуск безадгезивных фольгированных диэлектриков с высокими качественными характеристиками. Полиимидное основание диэлектриков имеет высокую адгезию к фольге и гарантированную равномерность сте-

пени имидизации 95—100%. Этим обеспечивает стабильность технологических режимов в процессе изготовления изделий из данных материалов, а также повышение срока хранения лакофольговых диэлектриков до 12 мес.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Медведев А. М. Материалы для гибких печатных плат // Технологии в электронной промышленности. — 2011. — № 3.
2. <http://www.gts-flexible.co.uk/>.
3. Гуськов Г. Я., Блинов Г. А., Газаров А. А. Монтаж микроэлектронной аппаратуры. — Москва: Радио и связь, 1986.
4. Важенни И. Н., Блинов Г. А., Коледов Л. А. и др. Микроэлектронная аппаратура на бескорпусных интегральных микросхемах. — Москва: Радио и связь, 1985.
5. Динев Д. А., Жора В. Д., Григорьева Н. Н., Грунянская В. П. Технология изготовления гибких терморезисторов на полиимидной основе // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 1. — С. 38—41.
6. Баклаев К. К., Воробьев А. В., Жора В. Д., Низкоомные акустические мембраны на полиимидной основе // Труды XIV Междунар. научн.-практ. конф. «СИЭТ-2013». — Украина, г. Одесса. — 2013, Т. I. — С. 248—250.
7. Вербицкий В. Г., Плис Н. И., Жора В. Д., Грунянская В. П. Сравнительный анализ методов сборки микросхем на гибких полиимидных носителях // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 5. — С. 37—41.
8. http://www.cgstape.com/doc/film_cm.htm.
9. Патент России 2240921. Способ получения полиимидного материала / В. Н. Воробьев, А. В. Воробьев. — Опубл. 27.11.2004.
10. <http://www.apogeeacoustic.com>.
11. Борщев В. Н., Листратенко А. М., Антонова В. А., Проценко М. А., Тимчук И. Т., Костышин Ю. Ю. Светодиодные модули на основе алюминиевой «chip on flex» (COF) технологии // Світлотехніка та електроенергетика. — 2008. — № 4. — С. 31—37.
12. Бессонов М. И., Котон М. М., Кудрявцев В. В., Лайус Л. А. Полиимиды — класс термостойких полимеров. — Ленинград: Наука, 1983.
13. А. с. 1 781 733 СССР. Способ сборки интегральных схем // А. Г. Шеревеня, И. А. Тучинский, В. Д. Жора — 1992. — Бюл. № 46.
14. Гаврюшин Н. Н. Методы изготовления гибких печатных плат и кабелей // Зарубежная радиоэлектроника. — 1985. — № 5. — С. 51—63.
15. <http://www.plastspb.ru/index.php/materialy/polietilenteraftalat-pet>.
16. Борщев В. Н., Антонова В. А., Листратенко А. М. и др. Комплексный подход к выбору конструктивно-технологических решений гибко-жестких односторонних модулей для комптоновской медицинской томографии // В кн.: Сцинтилляционные материалы. Инженерия, устройства, применение. — Харьков: ИСМА, 2009. — С. 111—127.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 17.02 2014 г.*

А. В. ВОРОБЬЮВ, В. Д. ЖОРА

Росія, м. Красногорськ, НВП «Поліком»; Україна, м. Київ, «НДІ мікроприладів» НТК «ІМК» НАНУ
E-mail: vdzhora@ukrpost.net

ГНУЧКІ ФОЛЬГОВАНІ ДІЕЛЕКТРИКИ: КЛАСИФІКАЦІЯ І АНАЛІЗ НАПРЯМІВ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ

Наведено класифікацію гнучких фольгованих діелектриків різних типів, проведено їх порівняльний аналіз. Виділено найбільш перспективний варіант виготовлення безадгезивних фольгованих діелектриків

на поліімідній основі, одержуваних нанесенням поліімідного лаку на металеву фольгу.

Ключові слова: гнучкі фольговані діелектрики, лакофольгові діелектрики, поліімідна основа, поліімідний лак, металева фольга.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2.56

UDC 621.793

A. V. VOROBYEV, V. D. ZHORA

Russia, Krasnogorsk, Research and Production Company "Polycom" LLC
Ukraine, Kiev, State enterprise "RI of Microdevices"
STS "Institute of Single Crystals" NAS of Ukraine
E-mail: vdzhora@ukrpost.net

FLEXIBLE FOILED DIELECTRICS: CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF WAYS FOR APPLICATION AND IMPROVEMENT

The paper presents a classification of flexible foiled dielectrics of different types. A comparative analysis of the properties of dielectrics manufactured with the use of adhesives, as well as without them, is given. Methods for the preparation of flexible foiled non-adhesive dielectrics, materials of conductive layer and a dielectric base are considered. The technical characteristics of the various polymer films used as a dielectric base are given. The advantages of the polyimide films in comparison with other polymer films are shown.

The most perspective option of manufacturing of non-adhesive foiled dielectrics based on polyimide obtained by applying of a polyimide lacquer on metal foil, the so-called lacquer-foil dielectrics, is highlighted.

The technology of manufacturing of lacquer-foil dielectrics with higher quality characteristics is described. The polyimide base of dielectrics has better adhesion to the foil and guaranteed uniformity of degree of imidization of 95–100%. The technology developed has allowed to carry out serial production of materials for electronic equipment. Series of lacquer-foil dielectrics of different thicknesses of foil is manufactured: aluminum – 10, 14, 20, 25 and 30 μm , nickel – 7 μm and copper – 18, 35, 50 μm . These materials are used for the manufacturing of flexible polyimide carriers, stubs, microcables, membranes of acoustic transducers and thermistors.

Keywords: flexible foiled insulators, lacquer-foil dielectrics, polyimide base, polyimide lacquer, metal foil..

REFERENCES

1. A. M. Medvedev. [Materials for flexible printed circuit boards]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*. 2011, no 3. (in Russian)
2. <http://www.gts-flexible.co.uk/>.
3. Gooskov G. Ya, Blinov G. A., Gazarov A. A. *Montazh mikroelektronnoi apparatury* [Installation of microelectronic devices]. Moscow. Radio and Communications, 1986.
4. Vazhenin I. N., Blinov G. A., Koledov L. A. et al. *Mikroelektronnaya apparatura na beskorpusnykh integral'nykh mikroskhemakh* [Microelectronic devices on unpackaged integrated circuits]. Moscow. Radio i svyaz, 1985.
5. Dinev D. A., Zhora V. D., Grigoryeva N. N., Grun'yanskaya V. P. [A technology for flexible thermoresistors on polyimide base]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2013, no 1, pp. 38-41. (in Russian)
6. Baklayev K. K., Vorobyev A. V., Zhora V. D. [Low impedance acoustic membranes based on polyimide films]. *Proceedings of the 14th International scientific-practical conference «Modern information and electronic technologies»*, Ukraine, Odessa. 2013, vol. II, pp. 248-250. (in Russian).
7. Verbitskiy V. G., Plis N. I., Zhora V. D., Grun'yanskaya V. P. [Comparative analysis of methods for the microcircuit assembly on flexible polyimide carriers]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2013, no 5, pp 37-41. (in Russian)
8. http://www.cgstape.com/doc/film_cm.htm.
9. Russia patent 2240921 [A method for producing a polyimide material] V. N. Vorobyev, A. V. Vorobyev. 27.11.2004.
10. <http://www.apogeeacoustic.com>
11. Borshchov V.N., Listratenko O. M., Antonova V. A., Protsenko M. A., Tymchuk I.T., Kostyshyn Y. Y. [LED modules on the basis of aluminium «Chip on flex» (COF) technology] *Svitlotekhnika ta elektroenergetika*. 2008, no 4, pp. 31-37. (in Russian)
12. Bessonov M. I., Koton M. M., Kudryavtsev V. V., Laius L. A. *Poliimidy – klass termostoikikh polimerov* [Polyimides – a class of heat-resistant polymers]. Leningrad, Nauka, 1983, 328 p.
13. USSR Copyright certificate 1781733. [A method for assembling integrated circuits] A. G. Sherevenya, I. A. Tuchinskii, V. D. Zhora. 1992. no 46.
14. Gavriushin N. [Methods of manufacturing of flexible printed circuit boards and cables] *Zarubezhnaya radioelektronika*. 1985, no 5, pp. 51-63. (in Russian)
15. <http://www.plastspb.ru/index.php/materialy/polietilenteraftalat-pet>.
16. Borschev V. N., Antonova V. A., Listratenko A. M. etc. [An integrated approach to the choice of structural and technological solutions for flex-rigid one-detector modules for Compton medical imaging]. In book *Stsintillyatsionnye materialy. Inzheneriya, ustroystva, primeneniye*. Khar'kov. ISMA, 2009, pp. 111-127. (in Russian)

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Алиева Алмаз Паша-кызы*, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроника», Азербайджанский технический университета, г. Баку
- Вихор Людмила Николаевна*, докт. физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, г. Черновцы
- Данилов Владимир Васильевич*, докт. техн. наук, заведующий кафедрой, Донецкий национальный университет
- Должиков Владимир Васильевич*, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Харьковский национальный университет радиоэлектроники
- Еримичой Илья Николаевич*, канд. техн. наук, зав. кафедрой, Одесский национальный политехнический университет
- Ефименко Анатолий Афанасьевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Зайков Владимир Петрович*, канд. техн. наук, пенсионер НИИ «Шторм», г. Одесса
- Кадацкий Анатолий Федорович*, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
- Каримов Абдулазиз Вахитович*, докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г. Ташкент
- Карушкин Николай Федорович*, канд. техн. наук, начальник отдела НИИ «Орион», г. Киев
- Ложковский Анатолий Григорьевич*, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
- Мокрицкий Вадим Анатольевич*, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Одесский национальный политехнический университет
- Невлюдов Игорь Шакирович*, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Харьковский национальный университет радиоэлектроники
- Панов Леонид Иванович*, канд. техн. наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет
- Плаксин Сергей Викторович*, докт. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт транспортных систем и технологий НАНУ, г. Днепропетровск
- Стевич Зоран*, докт. техн. наук, профессор, Технический факультет Бора Белградского университета
- Трофимов Владимир Евгеньевич*, канд. тех. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Ховерко Юрий Николаевич*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский центр «Кристалл», г. Львов
- Шинкаренко Владимир Викторович*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

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 наноэлектроника;
- 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 (закключение) 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).

Запустим экономику вместе!

международная выставка

elcom
Осень 2014

14-17
октября
2014

ЭНЕРГЕТИКА • ЭЛЕКТРОТЕХНИКА • ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Компания «Евроиндекс» приглашает к участию в международной выставке энергетики, электротехники, энергоэффективности **elcom Осень 2014**, которая состоится **14 — 17 октября** в выставочном центре «КиевЭкспоПлаза».

В 2014 году украинский бизнес столкнулся с беспрецедентными вызовами. Резкое падение экономики на протяжении первого квартала 2014 года привело к смещению традиционных бизнес-циклов. Многие компании корректируют свои стратегии, пересматривают принципы ведения бизнеса. Сегодня важно искать новые рыночные возможности, укреплять отношения с постоянными клиентами и создавать устойчивые бизнес-модели партнерства. Именно поэтому компания «Евроиндекс» поставила перед собой задачу провести выставку **elcom Осень 2014**, чтобы способствовать нормализации ситуации и формированию благоприятного бизнес-климата в отрасли осенью, обеспечить рынок производителей и поставщиков электротехнического оборудования надежным инструментом продаж и маркетинга.

Выставка пройдет одновременно с главной выставкой индустрии безопасности в Украине «**БЕЗПЕКА 2014**», которую посещают специалисты ключевых отраслей экономики — энергетики, промышленности, строительства.

Тематические
направления
выставки

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

СИСТЕМЫ
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ
И ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

КАБЕЛЬНО-
ПРОВОДНИКОВАЯ
ПРОДУКЦИЯ

СВЕТОТЕХНИКА

ПРОМЫШЛЕННАЯ
АВТОМАТИЗАЦИЯ

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ



Тел. +38(044) 461-91-21

<http://elcom.ua/>



тел./факс +38(057) 758-70-30,
758-70-29, 758-72-30

<http://www.expos.com.ua/info/?YR=2014&ex=8>

17-я специализированная выставка 8—9 октября 2014 г.



**Контрольно-измерительные
приборы**



**Электроника. Информатика.
Связь**



**Энергетика. Электротехника.
Энергоэффективность.
Энергосбережение**

**ПВЦ «Радмир Экспохолл»
(г. Харьков, ул. Академика Павлова, 271)**

Намерь готовили

*Алчевск, Баку, Белград, Винница, Днепропетровск,
Донецк, Киев, Корнвестхайм, Красногорск, Львов,
Нежин, Одесса, Ташкент, Харьков, Черновцы*



Пишите

Подписывайтесь

Читайте