

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

ДВАДЦАТА МІЖНАРОДНА
НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ




СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ЕЛЕКТРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ

27—31 травня 2019 року
Україна, м. Одеса

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

- Інформаційні технології в електроніці та телекомунікаціях
- Радіотехнічні, телекомунікаційні та телевізійні системи. Захист інформації в широкосмугових системах та комп'ютерних мережах
- Проектування, конструювання, виробництво та контроль електронних засобів
- Функціональна електроніка. Мікро- та нанотехнології

Плановані публікації
Труди конференції з тезами доповідей
Збірник доповідей (статей) у видавництві Springer 

www.tkea.com.ua/siet/inf.html



4 2018

ИЮЛЬ — АВГУСТ

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

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К. т. н. А. Ф. Бондаренко
(КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Акад. НАНУ, д. ф.-м. н. А. Е. Беляев (г. Киев, Украина)
Д. т. н. Н. М. Вакив (г. Львов, Украина)
Д. т. н. Г. А. Оборский (г. Одесса, Украина)
К. т. н. В. М. Чмилъ В. (г. Киев, Украина)
Е. А. Тихонова (г. Одесса, Украина)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д. т. н. С. Г. Антошук (г. Одесса, Украина)
Д. т. н. А. П. Бондарев (г. Львов, Украина)
Prof. I. Vajda (Budapest, Hungary)
Prof. D. Vinnikov (Tallinn, Estonia)
Prof. I. Galkin (Riga, Latvia)
К. т. н. Э. Н. Глушеченко (г. Киев, Украина),
зам. главного редактора
К. т. н. Г. Г. Горох (г. Минск, Республика Беларусь)
Prof. K. Dhoska (Tirana, Albania)
Д. ф.-м. н. В. В. Должиков (г. Харьков, Украина)
Д. т. н. А. А. Дружинин (г. Львов, Украина)
Д. т. н. А. А. Ефименко (г. Одесса, Украина),
зам. главного редактора
Д. ф.-м. н. Д. В. Корбутяк (г. Киев, Украина)
Д. т. н. С. И. Круковский (г. Львов, Украина)
Д. т. н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург, Российская
Федерация)
Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. С. Лысенко (г. Киев,
Украина)

Prof. J. Martins (Caparica, Portugal)
Д. т. н. И. Ш. Невлюгов (г. Харьков, Украина)
Dr. Sc. D. Nika (Chisinau, Moldova)
Д. т. н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев, Украина)
Prof. V. Pires (Setúbal, Portugal)
Д. ф.-м. н. С. В. Плаксин (г. Днепропетровск,
Украина)
К. т. н. Проконец В. М. (г. Киев, Украина)
Prof. E. Romero-Cadaval (Badajoz, Spain)
К. ф.-м. н. А. В. Рыбка (г. Харьков, Украина)
К. т. н. П. С. Сафронов (г. Одесса, Украина),
отв. секретарь редколлегии
Д. т. н. В. Н. Сигорец (г. Киев, Украина)
Д. т. н. В. С. Ситников (г. Одесса, Украина)
Dr. Sc. Z. Stević (Belgrade, Serbia)
Д. х. н. В. Н. Томашик (г. Киев, Украина)
К. т. н. В. Е. Трофимов (г. Одесса, Украина)

Подписка на журнал

Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.

Контактная информация

Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17;
tkea@optima.com.ua, www.tkea.com.ua,
+38 (048) 728-18-50, 728-49-46.

Редакция

Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко, П. С. Сафронов,
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова, Е. И. Корецкая.

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

Реферируется
в УРЖ «Джерело»
(г. Киев)

Журнал включен
в международную справочную
систему по периодическим
и продолжающимся изданиям
“Ulrich’s Periodicals Directory”
(США),
в международную систему
библиографических ссылок
CrossRef,
в наукометрическую базу РИНЦ,
в базу данных DOAJ,
в Google Scholar

Номер выпущен при поддержке
ОНПУ (г. Одесса),
НПП «Сатурн» (г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов)

Одобрено к печати
Ученым советом ОНПУ
(Протокол № 11 от 26.06 2018 г.)
Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

УЧРЕДИТЕЛИ
Институт физики полупровод-
ников им. В. Е. Лашкарёва
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»
Одесский национальный
политехнический университет
Издательство «Политехпериодика»

Свидетельство о регистрации
№ KB 21788-11688ПР
от 21.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Современные электронные технологии

Эффективность поразрядной конвейеризации вы-
числений в FPGA-компонентах систем критическо-
го применения. *В. В. Никул, А. В. Дрозд, Ю. В.
Дрозд, В. С. Озеранский* 3

Электронные средства: исследования, разработки

Исследование характеристик кремниевых фотоэлек-
трических преобразователей солнечных батарей при
перегреве. *А. В. Иванченко, С. В. Мазурик, А. С.
Тонкошкур* 14

Сенсоэлектроника

Электрофизические и фотоэлектрические характери-
стики трехбарьерной фотодиодной GaAs-структуры.
*О. А. Абдулхаев, Д. М. Ёдгорова, А. В. Каримов,
А. А. Якубов, Ш. М. Кулиев* 21

Изменение проводимости структур «пористый крем-
ний с наночастицами серебра — кремний» при детек-
тировании перекиси водорода. *О. Ю. Кутова, М. Г.
Душейко, Б. А. Лобода, Т. Ю. Обухова* (на укра-
инском) 28

СВЧ-техника

Управление падением напряжения кремниевого ди-
ода путем облучения электронами и термической
обработки. *А. В. Каримов, А. З. Рахматов, О. А.
Абдулхаев, У. Х. Арипова, А. Ю. Хидирназарова,
Ш. М. Кулиев* 33

Системы передачи и обработки сигналов

Метод адаптивной дельта-модуляции для произволь-
ных коэффициентов адаптации в сенсорных сетях
мобильного мониторинга ЭКГ. *А. В. Тимченко, В. И.
Лозинский* (на украинском) 38

Список рецензентов номера 43

Рекомендации авторам 44

Новые книги 13, 20, 37

ЗМІСТ

Сучасні електронні технології

Ефективність порозрядної конвеєризації обчислень у FPGA-компонентах систем критичного застосування. *В. В. Нікул, О. В. Дрозд, Ю. В. Дрозд, В. С. Озеранський* (3)

Електронні засоби: дослідження, розробки

Дослідження характеристик кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячних батарей при перегріві. *О. В. Іванченко, С. В. Мазурик, О. С. Тонкошкур* (14)

Сенсоелектроніка

Електрофізичні та фотоелектричні характеристики трьохбар'єрної фотодіодної GaAs-структури. *О. А. Абдулхаєв, Д. М. Йодгорова, А. В. Карімов, А. А. Якубов, Ш. М. Кулієв* (21)

Зміна провідності структур «пористий кремній з наночастинками срібла — кремній» при детектуванні перекису водню. *О. Ю. Кутова, М. Г. Душейко, Б. О. Лобода, Т. Ю. Обухова* (28)

НВЧ-техніка

Управління падінням напруги кремнієвого діода шляхом опромінення електронами та термічної обробки. *А. В. Карімов, А. З. Рахматов, О. А. Абдулхаєв, У. Х. Аріпова, А. Ю. Хідірназарова, Ш. М. Кулієв* (33)

Системи передачі та обробки сигналів

Метод адаптивної дельта-модуляції для довільних коефіцієнтів адаптації у сенсорній мережі мобільного моніторингу ЕКГ. *О. В. Тимченко, В. І. Лозинський* (38)

CONTENTS

Modern electronic technologies

Efficiency of the computation bitwise pipelining in FPGA-based components of safety-related systems. *V. V. Nikul, A. V. Drozd, J. V. Drozd, V. S. Ozeransky* (3)

Electronic devices: research, development

Investigation into the characteristics of silicon photovoltaic converters of solar batteries in case of overheating. *A. V. Ivanchenko, S. V. Mazurik, A. S. Tonkoshkur* (14)

Sensors

Electrophysical and photoelectric characteristics of a three-barrier photodiode GaAs structure. *O. A. Abdulkhaev, D. M. Yodgorova, A. V. Karimov, A. A. Yakubov, Sh. M. Kulihev* (21)

Changing the conductivity of porous silicon with silver nanoparticles/silicon structures when detecting hydrogen peroxide. *O. Yu. Kutova, M. G. Dusheyko, B. O. Loboda, T. Yu. Obukhova* (28)

Microwave engineering

Controlling voltage drops in silicon diodes by electron irradiation and thermal treatment. *A. V. Karimov, A. Z. Rakhmatov, O. A. Abdulkhaev, U. H. Aripova, A. Yu. Khidirnazarova, Sh. M. Kulihev* (33)

Signals transfer and processing systems

Adaptive delta modulation method for arbitrary adaptation coefficients in the sensor network of the mobile ECG monitoring. *O. B. Tymchenko, V. I. Lozynsky* (38)

В. В. НИКУЛ, д. т. н. А. В. ДРОЗД, к. т. н. Ю. В. ДРОЗД, к. т. н. В. С. ОЗЕРАНСКИЙ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: leraniku@gmail.com, drozd@ukr.net, dea_lucis@ukr.net, ozeransky@ukr.net

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОРАЗРЯДНОЙ КОНВЕЙЕРИЗАЦИИ ВЫЧИСЛЕНИЙ В FPGA-КОМПОНЕНТАХ СИСТЕМ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены вопросы эффективности цифровых компонентов в системах критического применения. Исследованы компоненты, проектируемые традиционно на основе матричных структур, создающих для этих систем проблему скрытых неисправностей, и поразрядные конвейеры, использование которых позволяет решить эту проблему. Проведен сравнительный анализ эффективности спроектированных на FPGA поразрядных конвейерных и матричных умножителей в сложности, производительности и энергопотреблении. Предложен метод, повышающий эффективность поразрядных конвейерных умножителей.

Ключевые слова: система критического применения, скрытая неисправность, цифровой компонент, матричная структура, поразрядный конвейер, FPGA-проектирование.

Информационные технологии за последние десятилетия существенно расширили область своих приложений, среди которых к наиболее важным следует отнести обеспечение функциональной безопасности объектов повышенного риска. К ним относятся энергосети и электростанции, скоростной транспорт и многое другое из нашего окружения. Растет их численность, сложность и мощность, что повышает стоимость последствий возможных отказов или аварий. Сдерживание роста таких рисков может выполняться за счет снижения вероятности инцидента, и эта задача возлагается на информационные технологии, реализованные в информационно управляющих системах критического применения (instrumentation and control safety-related systems) [1, 2]. Требования к этим системам регулируются международными стандартами, которые предусматривают обеспечение функциональной безопасности и самой системы, и объекта управления для предотвращения аварий, а в случае их развития — уменьшения последствий [3, 4].

Анализ современного уровня развития ресурсов

С точки зрения ресурсного подхода, системы критического применения являются результатом развития компьютерных систем, которое проявляется в диверсификации рабочего режима путем его разделения на нормальный и аварийный [5, 6].

При ресурсном подходе анализируется развитие ресурсов — моделей, методов и средств —

с позиции их интеграции в естественный мир. Подход определяет три уровня развития ресурсов: репликацию, диверсификацию и автономию. Нижний уровень — репликация — в естественном мире проходит под лозунгом: «Родить больше, чем умрет». Так вписываются в естественный мир, например, бактерии. При открытой ресурсной нише — экологической, технологической, рыночной и т. д. — всегда будет выбрана репликация. По заполнении ресурсной ниши для выживания необходимо перейти на уровень диверсификации: наштампованные клоны должны развить особенности — стать особями [7, 8].

В компьютерном мире представлены все уровни развития ресурсов, но доминирует репликация, которая проявляется в развитии матричных структур, штампуемых из однородных элементов. В [9–12] анализируются цифровые компоненты современных компьютерных систем. В основе схем этих компонентов лежат матричные структуры, составленные из одинаковых операционных элементов. Отмечаются недостатки матричных структур, свойственные уровню репликации: низкий процент использования операционных элементов при значительной сложности схем и высоком энергопотреблении. В 32-разрядном матричном умножителе и делителе каждый из 10^3 операционных элементов используется только на 1,6 и 0,1 % времени соответственно, а с переходом к разрядности $n = 64$ эти показатели снижаются до 0,8 и 0,02 % [9, 10]. Следует отметить, что остальное время операционные элементы не простаивают, а поддерживают волны паразитных переключений, которые образуют-

ся в матричных структурах вследствие распространения сигналов по путям с различным временем их прохождения [11, 12]. Количество паразитных переключений многократно превышает количество функциональных переключений, определяя в основном динамическую составляющую энергопотребления. Статическая составляющая определяется значительными размерами матричных структур. Общая картина энергопотребления матричных структур дополняется также динамической и статической составляющими системы ввода-вывода, которые пропорциональны количеству входов и выходов. В матричном умножителе их насчитывается $4n$, что для $n = 64$ составляет 256.

Цифровые компоненты с доминированием матричных структур получили продолжение в системах критического применения, создавая проблему скрытых неисправностей, которые могут достаточно долго накапливаться в цифровых схемах в процессе их нормального функционирования и проявляться в аварийном режиме в виде снижения отказоустойчивости цифровых компонентов, при том что отказоустойчивые решения являются основой обеспечения функциональной безопасности систем критического применения [13].

Проблема скрытых неисправностей по причине их скрытости известна лишь благодаря неудачно закончившимся попыткам их выявления с использованием имитационных режимов. Имитация условий аварийного режима, часто с отключением аварийных защит, представляет потенциальную опасность в связи с возможностью несанкционированного запуска такого режима человеком или по причине неисправности. Ярким примером последствий отключения аварийных защит может служить Чернобыльская катастрофа.

Как отмечается в [10], для компьютерной системы, которая все время работает в одном и том же рабочем режиме, проблемы скрытых неисправностей не существует, поскольку неисправность остается скрытой на протяжении всего рабочего времени. Следовательно, эта проблема является проблемой роста, когда системы поднимаются на уровень диверсификации, а их компоненты остаются на уровне репликации. Отсюда следует возможное решение проблемы — поднять уровень компонентов до уровня системы, развивая конвейерный параллелизм, отражающий в эволюции ресурсов уровень диверсификации.

Можно выделить три уровня развития конвейерных систем. К нижнему уровню следует отнести современные компьютерные системы и их цифровые компоненты, которые, как правило,

строятся конвейерными, но их секциями служат однотактные матричные устройства, выполняющие обработку числовых данных в параллельных кодах со всеми отмеченными выше недостатками матричных структур.

К следующему уровню можно отнести известные решения по конвейеризации матричных структур цифровых компонентов в LUT-ориентированной архитектуре FPGA (field programmable gate array) проектов [14–16]. Секция конвейера содержит один LUT (look-up table) и триггер или один только триггер для выравнивания путей распространения данных по тактам. В таких решениях сохраняются и обработка данных в параллельных кодах чисел, и все элементы матричной структуры, а связи между ними проходят через один или несколько триггеров, дополнительно усложняющих схему и повышающих статическую и динамическую составляющие энергопотребления. При этом повышается производительность — результаты выдаются с тактовой частотой конвейера, однако из-за того, что сохраняются элементы матричных структур, проблема скрытых неисправностей не решается.

Третий, наивысший уровень развития конвейерных систем достигается при упрощении секций конвейера до одного операционного элемента, обрабатывающего данные по одному разряду. При этом достигается максимальное сокращение матричных структур и максимальное распараллеливание вычислений. Традиционные конвейерные компоненты преобразуются в поразрядные конвейеры, принимающие и обрабатывающие входные данные, а также выдающие результаты в последовательных кодах, которые не оставляют места для скрытых неисправностей. Регистровые структуры поразрядных конвейеров являются элементами тестопригодного проектирования — сканирующими регистрами [17], которые исключают саму возможность накопления скрытых неисправностей.

Вместе с тем, распараллеливание вычислений пошло по пути обработки данных в параллельных кодах чисел с использованием матричных структур, и поразрядные конвейеры, выполняющие операции в последовательных кодах, не получили должного развития. Многие десятилетия развития цифровых компонентов были потрачены на совершенствование матричных структур и создание мощной поддерживающей их инфраструктуры. Под них разрабатывались и продолжают разрабатываться модели и методы проектирования, элементная база и САПР. Достигнутые успехи существенно упрочили позиции матричных структур, поэтому важно проанализировать конкурентоспособность поразряд-

ных конвейеров в условиях, диктуемых инфраструктурой матричных структур.

В [10] выполнен сравнительный анализ эффективности поразрядных конвейерных и матричных структур на примере умножителей двоичных кодов. Однако анализ проводился сравнением поразрядных конвейеров с библиотечными матричными умножителями, что не совсем корректно по причине отсутствия библиотечных поразрядных конвейерных решений.

В данной работе проводится сравнительный анализ эффективности поразрядных конвейерных и матричных структур без использования библиотечных решений, т. е. при более равных условиях их проектирования на FPGA. Операция умножения выбрана с учетом того, что она является ключевой для приближенных вычислений, а их доминирование постоянно растет по мере вписывания технологий в реалии естественного мира — параллельного и размытого. Эта операция присутствует в самой записи числа с плавающей точкой и потому в явном или неявном виде используется во всех действиях, выполняемых над мантиссами, а результаты этих действий наследуют свойства произведения.

Объекты исследования

Рассмотрим матричный и поразрядный конвейерный умножители на примере наиболее простых схемотехнических решений. Матричное устройство имеет регулярную структуру, описанную в [18, с. 218, рис. 6.18]. Схема поразрядного конвейерного умножителя описана в [19] и содержит регистр множимого A и регистр множителя B , группу из n элементов I и вертикальный сумматор. На входы устройства поступают последовательные коды сомножителей, начиная с младших разрядов. В каждом такте очередной разряд множителя B записывается в очередной разряд регистра множителя вплоть до его заполнения, а разряд множимого A вдвигается в регистр множимого и продвигается в нем до его покидания (рис. 1). Значения разрядов множимого A и множителя B с выходов i -х разрядов множимого и множителя ($i = 1, \dots, n$) поступают на входы i -го элемента I группы. В каждом такте на выходах элементов I формируются конъюнкции очередного столбца матрицы конъюнкций произведения. Эти конъюнкции поступают на входы вертикального сумматора, который в каждом такте подсчитывает количество единиц с учетом переносов из предыдущих тактов и формирует (а также задерживает) переносы в следующие такты и вычисляет разряд суммы. Разряды суммы подаются на выход устройства, составляя за $2n$ тактов полное произведение в последовательном коде.

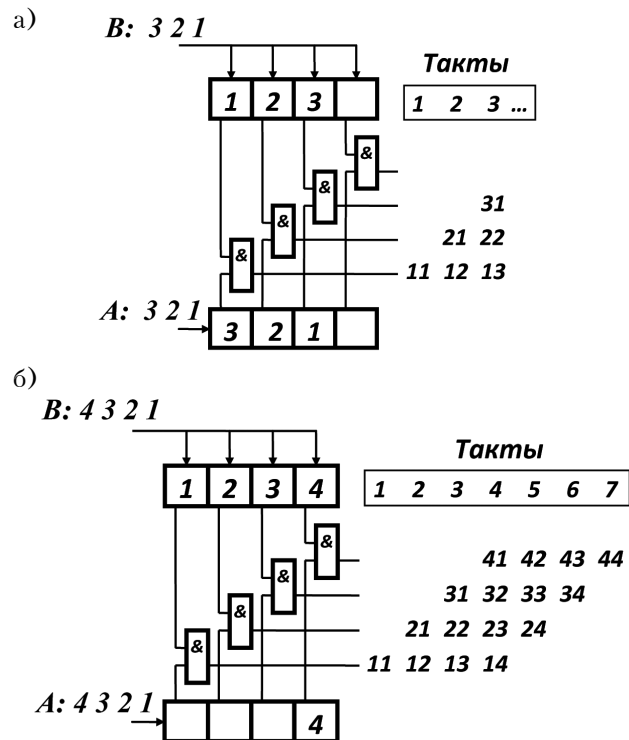


Рис. 1. Схема работы поразрядного конвейерного умножителя с разрядностью $n = 4$ при числе тактов три (а) и семь (б)

Сравнение эффективности умножителей выполняется по показателям сложности схемных решений, их производительности и энергопотребления по результатам проектирования устройств разной разрядности на FPGA с использованием САПР Intel Altera Quartus II, стоящей в одном ряду с другими САПР, ориентированными на поддержку матричных структур. Поддержка матричных структур проявляется в предоставлении широкой библиотеки матричных узлов, а также использовании метода заготовки результатов, который относится к верхнему уровню развития ресурсов, для ускорения вычислений при сложении параллельных кодов чисел в матричных структурах. Проектирование поразрядных конвейеров ограничено структурой такта, который образуется в основном не задержкой операционного элемента, выполняющего вычисления, а паразитной задержкой регистра.

Результаты исследования и их обсуждение

Схемы поразрядного конвейерного и матричного умножителей для разрядностей 8, 16, 24 и 32 имплементированы в FPGA Altera Cyclone II EP2C35F672C6 family посредством САПР Intel Altera Quartus II v13 64 b. При этом настройки компилятора, находящиеся в меню проекта «Assignment → Settings → Analysis & Synthesis Settings», использованы по умолчанию. В оп-

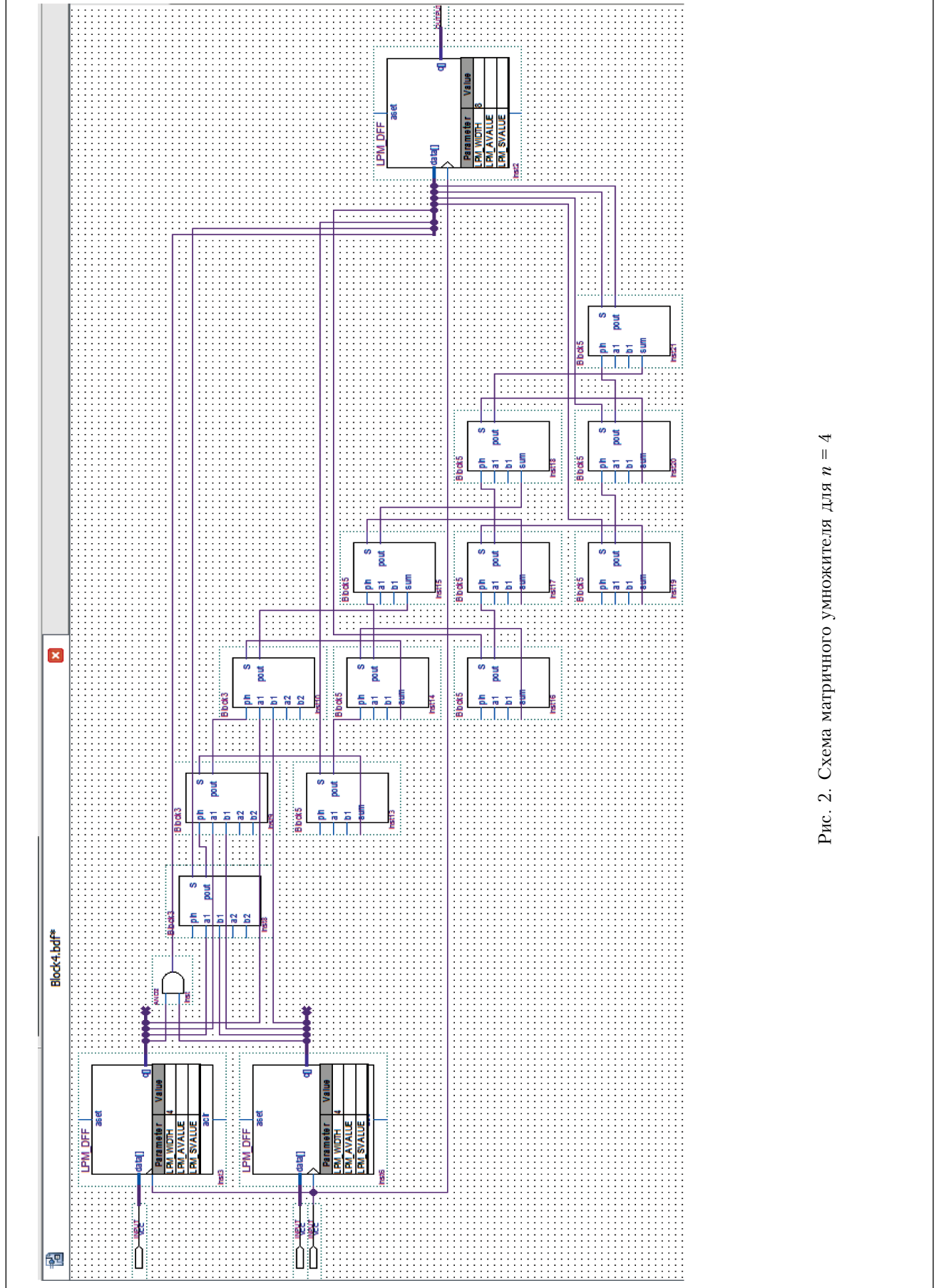
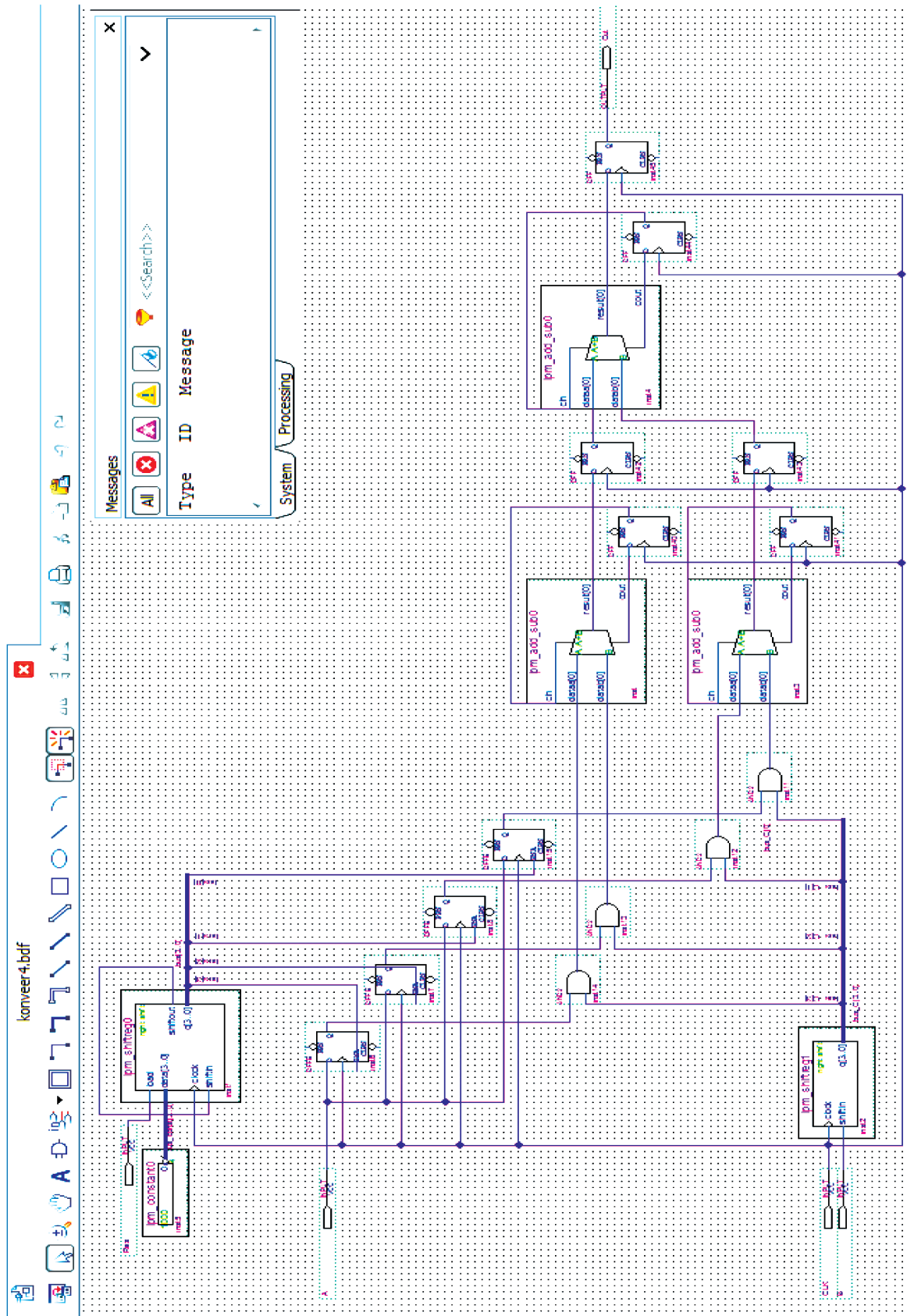


Рис. 2. Схема матричного умножителя для $n = 4$


 Рис. 3. Схема поразрядного конвейерного умножителя для $n = 4$

ции «Optimization Technique» выбран режим «Balanced», опция «Power Play Power Optimization» установлена в режим работы «Normal compilation».

На рис. 2 и 3 показаны схемы матричного и поразрядного конвейерного умножителей, полученные в результате проектирования для $n = 4$.

Сложность схемной реализации определяется по результатам проектирования и оценивается количеством использованных логических элементов LE (logic elements), содержащих операционный элемент LUT и однобитный программируемый регистр [20]. Производительность и энергопотребление схем рассчитываются с учетом продолжительности такта их работы и потребляемой мощности, которые оцениваются при помощи утилит «Time Quest Timing Analyzer» и «Power Play» [21, 22].

В табл. 1 приведены результаты расчета параметров схем матричных и поразрядных конвейерных умножителей различной разрядности n : сложность C_M , C_K ; продолжительность тактов работы T_M , T_K ; потребляемая мощность N_M , N_K ; производительность P_M , P_K ; энергопотребление E_M , E_K , а также относительные показатели $P_{K/M} = P_K/P_M$, $E_{M/K} = E_M/E_K$, которые позволяют сравнивать анализируемые схемы по производительности и энергопотреблению.

Таблица 1

Параметры схем матричных и поразрядных конвейерных умножителей различной разрядности

| Параметр | Количество разрядов n | | | |
|------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 8 | 16 | 24 | 32 |
| C_M | 179 | 739 | 1683 | 3011 |
| C_K | 39 | 78 | 126 | 160 |
| R_C | 5 | 11 | 18 | 28 |
| C_R | 159 | 691 | 1662 | 2980 |
| T_M , нс | 8,07 | 17,24 | 25,59 | 36,21 |
| T_K , нс | 2,38 | 2,38 | 2,38 | 2,38 |
| N_M , мВт | 142,78 | 150,08 | 156,31 | 159,18 |
| N_K , мВт | 160,33 | 237,51 | 340,62 | 462,86 |
| P_M , c^{-1} | $123,9 \cdot 10^6$ | $58,0 \cdot 10^6$ | $37,6 \cdot 10^6$ | $27,6 \cdot 10^6$ |
| P_K , c^{-1} | $131,3 \cdot 10^6$ | $144,4 \cdot 10^6$ | $157,6 \cdot 10^6$ | $183,8 \cdot 10^6$ |
| $P_{K/M}$ | 1,06 | 2,49 | 4,19 | 6,65 |
| E_M , мВт·нс | 1152,2 | 2587,4 | 4000,0 | 5763,9 |
| E_K , мВт·нс | 1221,1 | 1644,4 | 2161,6 | 2518,0 |
| $E_{M/K}$ | 0,94 | 1,57 | 1,85 | 2,29 |

Значения параметра сложности C_M и C_K схем матричных и поразрядных конвейерных умножителей указывают на возможность замены одного матричного устройства на схему, состоящую из нескольких одновременно работающих поразрядных конвейеров той же сложности. Их количество R_C , определяемое в результате проектирования схем, превосходит отношение C_M/C_K и увеличивается с ростом разрядности n быстрее, чем это отношение. В табл. 1 приведены полученные экспериментально значения R_C и сложности C_R схем, состоящих из R_C поразрядных конвейерных умножителей.

Как видно из табл. 1, рост разрядности n приводит к повышению сложности схем умножителей, причем сложность поразрядных конвейерных схем увеличивается пропорционально n , а сложность матричных умножителей — в квадратичной зависимости, что обеспечивает линейный рост R_C .

Продолжительность такта определяется при работе умножителей на максимальной тактовой частоте. С увеличением разрядности n продолжительность такта матричного умножителя линейно возрастает, а поразрядного конвейера остается постоянной (см. табл. 1). Такт поразрядного конвейерного умножителя короче матричного решения — и библиотечного [10], и спроектированного, однако в значительно меньшей степени, чем это можно было ожидать, если учитывать, что одному операционному элементу секции конвейера противопоставляется цепочка из $2n - 2$ последовательно соединенных операционных элементов структуры однотактного матричного умножителя. Отказ в эксперименте от использования библиотечного матричного умножителя несколько выравнивает условия проектирования сравниваемых устройств, и разница в продолжительности их тактов увеличивается, но сохраняются еще, по крайней мере, два фактора, действующих в современных САПР в пользу матричных структур. Первый кроется в ускоренном распространении переноса при сложении конъюнкций матрицы произведения в однотактном умножителе. Операционные элементы строятся на логических элементах LE, работающих в арифметическом режиме с заготовкой значений суммы и переноса полного сумматора по методу условного переноса. При этом заготовленными являются также пути их распространения. Суть второго фактора заключается в затынутом такте поразрядного конвейера, который определяется в основном задержкой регистра и в значительно меньшей степени задержкой операционного элемента.

Поскольку сравнение производительности и энергопотребления матричных и поразрядных конвейерных умножителей целесообразно выполнять при равной сложности схем, расчет мощности осуществлялся для матричного умножителя и для схемы, составленной из R_C поразрядных конвейерных умножителей. Полученные значения потребляемой мощности (см. табл. 1) состоят из статической и динамической составляющих ядра и системы ввода-вывода FPGA-проектов. Схема поразрядных конвейеров потребляет большую мощность по сравнению с проектируемым матричным умножителем, поскольку функционирует на более высокой тактовой частоте, что с ростом разрядности n существенно увеличивает динамическую составляющую мощности.

Схемные решения оцениваются их производительностью, которая для матричного умножителя определяется величиной, обратной продолжительности такта, переведенной в секунды:

$$P_M = 10^9 / T_M, \quad (1)$$

а для схемы поразрядных конвейеров вычисляется по формуле

$$P_K = 10^9 R_C / (2nT_K). \quad (2)$$

В табл. 1 приведены значения производительности P_M и P_K , полученные утилитой «Time Quest Timing Analyzer» для матричного умножителя и схемы поразрядных конвейеров, а также их отношение $P_{K/M}$. Здесь видно, что с ростом разрядности сомножителей производительность P_M матричных умножителей снижается, причем быстрее, чем повышается разрядность, а производительность P_K схемы поразрядных конвейеров повышается, многократно превосходя P_M , что отражается увеличением их отношения $P_{K/M}$ с 1,06 до 6,65 с⁻¹. Такое изменение производительности объясняется ускоренным ростом количества R_C конвейеров в объединяющей их схеме.

Энергопотребление сравниваемых умножителей рассчитывается за время выполнения ими одной операции. Для матричного умножителя оно оценивается произведением мощности на время выполнения операции, т. е. на продолжительность такта:

$$E_M = N_M T_M, \quad (3)$$

а для схемы поразрядных конвейеров вычисляется по формуле

$$E_K = N_K \cdot 2nT_K / R_C. \quad (4)$$

Из приведенных в табл. 1 данных видно, что при увеличении разрядности сомножителей растет

энергопотребление обоих сравниваемых умножителей, а также отношение $E_{M/K}$ (с 0,94 до 2,29).

Таким образом, проведенный анализ позволяет заключить, что поразрядная конвейеризация вычислений имеет преимущества по производительности и энергопотреблению перед матричными решениями даже при проектировании на САПР, ориентированной на разработку матричных структур. Очевидно, что в таком случае уровень достигнутых показателей ниже возможного, поэтому для их улучшения в переходный период (до создания собственной инфраструктуры поразрядных конвейеров) требуется адаптация схемных решений к особенностям существующих САПР.

Метод повышения эффективности поразрядных конвейеров

Из формул (2) и (4) следует, что производительность и энергопотребление поразрядных конвейеров зависят от времени выполнения операции умножения, которая длится $2n$ тактов, поэтому для повышения их эффективности предлагается в одном такте обрабатывать два двоичных разряда сомножителей. При таком подходе вдвое сокращается количество тактов выполнения операции, что позволяет ожидать сокращения времени вычислений и, соответственно, улучшения указанных параметров. Вместе с этим, обработка двух двоичных разрядов в такте является уступкой матричным структурам с целью адаптации поразрядных конвейеров к особенностям современных САПР.

Обработка данных по два двоичных разряда в такте может быть интерпретирована как обработка разряда четверичной системы счисления, что оставляет предлагаемый метод в рамках поразрядной конвейеризации с увеличением основания двоично-кодированной системы счисления. Метод иллюстрируется табл. 2 для случая сомножителей A и B при разрядности $n = 4$.

Каждый из сомножителей A и B представляется двумя последовательными кодами, составленными из разрядов с четными и нечетными номерами. В тактах 1–4 обрабатываются двоичные разряды $B\{i\}$ и $A\{j\}$ последовательных кодов сомножителей и вычисляются конъюнкции $C\{i, j\} = B\{i\}A\{j\}$ с весом от 2^0 до 2^7 ($i = 1, \dots, 4, j = 1, \dots, 4$). В табл. 2 строки $A\{n\}$, $A\{ч\}$, $B\{н\}$, $B\{ч\}$ показывают, соответственно, положение в тактах и вес нечетных и четных разрядов сомножителей A и B . В следующих восьми строках показаны конъюнкции разрядов $B\{i\}$ сомножителя B и разрядов последовательных кодов $A\{n\}$, $A\{ч\}$ сомножителя A (конъюнкции, помеченные символом «*», сдвигаются на один такт, как это показано в табл. 2).

Иллюстрация метода повышения эффективности поразрядных конвейеров

| Параметр | Такты | | | | | | | |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | |
| | Вес | | | | | | | |
| | 2^0 | 2^1 | 2^2 | 2^3 | 2^4 | 2^5 | 2^6 | 2^7 |
| $A\{n\}$ | $A\{1\}$ | | $A\{3\}$ | | | | | |
| $A\{u\}$ | | $A\{2\}$ | | $A\{4\}$ | | | | |
| $B\{n\}$ | $B\{1\}$ | | $B\{3\}$ | | | | | |
| $B\{u\}$ | | $B\{2\}$ | | $B\{4\}$ | | | | |
| $B\{1\} A\{n\}$ | $C\{1,1\}$ | | $C\{1,3\}$ | | | | | |
| $B\{3\} A\{n\}$ | | | $C\{3,1\}$ | | $C\{3,3\}$ | | | |
| $B\{2\} A\{n\}$ | | $C\{2,1\}$ | | $C\{2,3\}$ | | | | |
| $B\{4\} A\{n\}$ | | | | $C\{4,1\}$ | | $C\{4,3\}$ | | |
| $B\{2\} A\{u\}^*$ | | | $C\{2,2\}$ | | $C\{2,4\}$ | | | |
| $B\{4\} A\{u\}^*$ | | | | | $C\{4,2\}$ | | $C\{4,4\}$ | |
| $B\{1\} A\{u\}$ | | $C\{1,2\}$ | | $C\{1,4\}$ | | | | |
| $B\{3\} A\{u\}$ | | | | $C\{3,2\}$ | | $C\{3,4\}$ | | |

Таблица 3

Параметры конвейерного умножителя по два разряда

| n | R_C | C_K | T_K , нс | N_K , мВт | P_K , c^{-1} | E_K , мВт·нс |
|-----|-------|-------|------------|-------------|--------------------|----------------|
| 8 | 4 | 179 | 2,38 | 173,12 | $206,2 \cdot 10^6$ | 824,1 |
| 16 | 7 | 693 | 2,38 | 246,11 | $183,8 \cdot 10^6$ | 1338,8 |

Сложение вычисленных конъюнкций согласно их весу позволяет с учетом переносов получить последовательный код произведения сомножителей A и B .

Схема умножителя, выполненная по предложенному методу, описана в [23]. Она имплементирована в FPGA-проекты для случаев разрядности $n = 8$ и $n = 16$ и исследована по показателям сложности, производительности и энергопотребления так, как это описано выше. Результаты представлены в табл. 3.

Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 1 и 3, указывает на то, что использование предложенного метода обеспечило рост производительности P_K поразрядных конвейерных умножителей с разрядностью $n = 8$ и $n = 16$ до значений, соответственно, $206,2 \cdot 10^6$ и $183,8 \cdot 10^6 c^{-1}$, что повысило эффективность поразрядной конвейеризации $P_{K/M}$ в 1,57 (с 1,06 до 1,66) и в 1,27 (с 2,49 до 3,17) раз. При этом энергопотребление E_K снизилось до 824,1 мВт·нс для $n = 8$ и до 1338,8 мВт·нс для $n = 16$, а эффективность

$E_{M/K}$ выросла, соответственно, в 1,49 (с 0,94 до 1,40) и в 1,23 (с 1,57 до 1,93) раз.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что поразрядные конвейерные умножители демонстрируют высокую эффективность, превосходящую матричные решения и в производительности, и в энергопотреблении даже при проектировании цифровых компонентов на САПР матричной ориентации. Предложенный метод повышения эффективности поразрядных конвейеров обеспечивает дополнительное улучшение их характеристик, что актуально в период преодоления традиций матричного доминирования и становления поразрядной конвейеризации вычислений, и при этом делает определенную уступку матричной ориентации САПР.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Харченко В. С., Скляр В. В., Тарасюк О. М. Анализ рисков аварий для ракетно-космической техники: эволюция причин и тенденций // Радиоэлектронні та комп'ютерні системи. — 2003. — № 3. — С. 135–149.
2. Brezhnev E. Riskanalysis in critical informational control system based on computing with words' models // Proc. of VII International Workshop Digital Technologies. — Zhilina, Slovak Republic. — 2010. — P. 19–20.
3. IEC 61508-1:2010. Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety related systems. Part 1: General requirements. — Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.
4. Andrashov A., Kharchenko V., Siora A. et al. Certification of FPGA-based safety Instrumentation and Control platform in accordance with IEC 61508 // The First

International Workshop Critical Infrastructure Safety and Security (CrISS-DESSERT 2011). — Kirovograd, Ukraine. — 2011. — Vol. 1. — P. 148–152

5. Bakhmach E., Herasimenko A., Golovyr V. et al. FPGA-based NPP I&C Systems: Development and Safety Assessment. — Kharkiv: RPC Radiy, National Aerospace University “KhAI”, SSTC on Nuclear and Radiation Safety, 2008.

6. Kharchenko V., Gorbenko A., Sklyar V., Phillips C. Green computing and communications in critical application domains: challenges and solutions // Proc. of the 9th International Conference on Digital Technologies 2013. — Zhilina, Slovak Republic. — 2013. — P. 191–197.

7. Drozd J., Drozd A. Models, methods and means as resources for solving challenges in codesign and testing of computer systems and their components // Digital Technologies: Proc. of 10th International Conference. — Zhilina, Slovak Republic. — 2013. — P. 176–180. — <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2013.6566307>

8. Drozd J., Drozd, Antoshchuk S. Green IT engineering in the view of resource-based approach // In book: Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures, Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 74. — Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing. — 2017. — P. 43–65. — http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7_3

9. Drozd J., Drozd A., Antoshchuk S., Kushnerov A., Nikul V. Effectiveness of Matrix and Pipeline FPGA-Based Arithmetic Components of Safety-Related Systems // Proc. of 8th IEEE International Conference Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. — Warsaw, Poland. — 2015. — P. 785–789. — <http://dx.doi.org/10.1109/IDAACS.2015.7341410>

10. Дрозд А. В., Дрозд Ю. В., Сулима Ю. Ю., Нікул В. В. Перспективи в використанні порозрядної конвейерної обробки в компонентах систем критичного призначення // Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2018. — № 28 (104). — С. 186–192.

11. Shum W., Anderson J.H. FPGA Glitch Power Analysis and Reduction // International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED). — 2011. — P. 27–32.

12. Vikas D. A review on glitch reduction techniques // International Journal of Research in Engineering and Technology. — 2014. — Vol. 3(2). — P. 145–148.

13. Drozd M., Drozd A. SafetyRelated instrumentation and control systems and a problem of the hidden faults // Digital Technologies: Proceedings of the 10th International Conference. — Zhilina, Slovak Republic. — 2014. — P. 137–140.

14. Panato A., Silva S., Wagner F., Johan M., Reis R., Bampi S. Design of very deep pipelined multiplier for FPGAs // Proceedings Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition. — 2004. — Paris, France. — <https://dx.doi.org/10.1109/DATE.2004.1269200>

15. Cadenas O., Megson G. A clocking technique for FPGA pipelined designs // Journal of System Architecture. — 2004. — Vol. 50, iss. 11. — P. 687–696. — <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2004.04.001>

16. Wojko M. Pipelined Multipliers and FPGA Architectures // In: Field Programmable Logic and Applications. FPL 1999. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1673 / Ed. by Lysaght P., Irvine J., Hartenstein R. — Springer, Berlin, Heidelberg, 1999. — https://doi.org/10.1007/978-3-540-48302-1_36

17. Abramovici M., Breuer M. A., Friedman A. D. Digital Systems Testing and Testable Design // Wiley-IEEE Press. — New York. — 1990. — P. 652.

18. Мельник А. О. Архітектура комп'ютера. — Луцьк: Волинська обласна друкарня, 2008.

19. Drozd A. and Sitnikov V. An online testing method for a digit by digit pipeline multiplier with truncated calculations // Proc. East-West Design & Test Conference. — Yalta—Alushta, Ukraine, 2004. — P. 76–82.

20. Cyclone II Architecture. Cyclone II Device Handbook Version 3.1. — Altera Corporation, 2007. — Access mode: http://www.Altera.com/literature/hb/cyc2/cyc2_cii51002.pdf

21. Using TimeQuest Timing Analyzer. Altera Corporation — University Program, 2013. — Access mode: ftp://ftp.altera.com/up/pub/Intel_Material/13.0/Tutorials/Timequest.pdf

22. PowerPlay Power Analysis. Quartus II Handbook Version 13.1.0. — Altera Corporation, 2013. — Access mode: http://www.altera.com/literature/hb/qts/qts_qii5301_3.pdf

23. Пат. № 117062 України. Пристрій для множення N-розрядних чисел / О. В. Дрозд, В. В. Нікул, С. А. Нестеренко, Р. О. Шапорін. — 2018. — Бюл. № 11.

Дата поступления рукописи
в редакцию 07.05 2018 г.

В. В. НІКУЛ, О. В. ДРОЗД,
Ю. В. ДРОЗД, В. С. ОЗЕРАНСЬКИЙ

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: leraniku@gmail.com, drozd@ukr.net,
dea_lucis@ukr.net, ozersansky@ukr.net

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОРОЗРЯДНОЇ КОНВЕЄРИЗАЦІЇ ОБЧИСЛЕНЬ У FPGA-КОМПОНЕНТАХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Використання комп'ютерних систем як систем критичного застосування для забезпечення функціональної безпеки об'єктів підвищеного ризику підняло їх в розвитку ресурсів на рівень диверсифікації, а цифрові компоненти, що традиційно проектуються на основі матричних структур, залишилися на нижньому рівні реплікації. Ця невідповідність породила проблему прихованих несправностей, які можуть накопичуватися в компонентах у нормальному режимі та знижувати їх відмовостійкість і безпеку в аварійному режимі. Порозрядні конвеєри, що відносяться до рівня диверсифікації, дозволяють вирішити цю проблему, але змушені конкурувати з матричними структурами, під які створено потужну інфраструктуру, що їх підтримує.

В роботі проведено порівняльний аналіз ефективності порозрядних конвеєрних і матричних помножувачів, спроектованих на FPGA. Проведені дослідження показали, що порозрядні конвеєри демонструють високу ефективність, що перевершує матричні рішення і в продуктивності, і в енергоспоживанні навіть

при проектуванні на САПР матричної орієнтації. Оскільки ця орієнтація знижує переваги порозрядних конвеєрів, для підвищення їхньої ефективності запропоновано метод, який забезпечує додаткове поліпшення цих характеристик і при цьому робить певну поступку матричній орієнтації САПР, що є актуальним в перехідний період – до подолання традицій матричного домінування і становлення порозрядної конвеєризації обчислень.

Ключові слова: система критичного застосування, прихована несправність, цифровий компонент, матрична структура, порозрядний конвеєр, FPGA-проекування.

DOI: 10.15222/TKEA2018.4.03
UDC 004.315

V. V. NIKUL, A. V. DROZD,
J. V. DROZD, V. S. OZERANSKY

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
E-mail: leraniku@gmail.com, drozd@ukr.net,
dea_lucis@ukr.net, ozeransky@ukr.net

EFFICIENCY OF THE COMPUTATION BITWISE PIPELINING IN FPGA-BASED COMPONENTS OF SAFETY-RELATED SYSTEMS

The use of computer systems like safety-related systems to ensure the functional safety of high-risk objects has raised them in the development of resources to the level of diversification. At the same time, the digital components, traditionally designed on the basis of array structures, remained at the lower level of a replication of resources. This discrepancy has created a problem of the hidden faults that can be accumulated in digital components during a prolonged normal mode and reduce their fault tolerance and system functional safety in the most critical emergency mode. Bitwise pipelines related to the level of resource diversification allow solving the problem of the hidden faults, but they are compelled to compete with the array structures, for which a powerful supporting infrastructure has been created for many decades.

The paper presents a comparative analysis of the efficiency of FPGA-based bitwise pipelines and matrix structures. Studies have shown that bitwise pipelines exhibit high efficiency exceeding that of the matrix structures in terms of both performance and energy consumption, even when designing a matrix orientation on CAD. Since such orientation reduces the advantages of bitwise pipelines, a method is proposed to increase their efficiency, which improves their throughput and energy consumption, while making a certain concession to the matrix orientation of CAD. This would be particularly important during the transitional period, while the traditions of matrix domination are to be overcome and the of bitwise pipeline computing is to be formed.

Keywords: safety-related system, hidden fault, digital component, array structure, bitwise pipeline, FPGA designing.

REFERENCES

1. Kharchenko V. S., Sklyar V. V., Tarasyuk O. M. [Analysis of accident risks for rocket and space technology: the evolution of causes and trends]. *Radio Electronic and Computer Systems*, 2003, no. 3, pp. 135-49. (Rus)
2. Brezhnev E. Risk-analysis in critical informational control system based on computing with words' models. *Proceedings of VII International Workshop Digital Technologies*, Zhilina, Slovak Republic, 2010, pp. 19–20.
3. IEC 61508-1. *Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety related systems. Part 1: General requirements*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.
4. Andrashov A., Kharchenko V., Siora A., Sklyar V., Volkoviy A. Certification of FPGA-based safety Instrumentation and Control platform in accordance with IEC 61508. *The First International Workshop Critical Infrastructure Safety and Security (CrlSS-DESSERT 2011)*, Kirovograd, Ukraine, 2011, vol. 1, P. 148-152.
5. Bakhmach E., Herasimenko A., Golovyr V. et al. FPGA-based NPP I&C Systems: Development and Safety Assessment. *RPC Radiy, NAU "KhAI" Publ., SSTC on Nuclear and Radiation Safety*, p. 188.
6. Kharchenko V., Gorbenko A., Sklyar V., Phillips C. Green computing and communications in critical application domains: challenges and solutions. *Proceedings of the 9th International Conference on Digital Technologies*, Zhilina, Slovak Republic, 2013, pp. 191-197.
7. Drozd J., Drozd A. Models, methods and means as resources for solving challenges in codesign and testing of computer systems and their components. *Proceedings of the Ninth International Conference on Digital Technologies*. Zhilina, Slovak Republic, 2013, pp. 176-180. <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2013.6566307>
8. Drozd J., Drozd A., Antoshchuk S. Green IT engineering in the view of resource-based approach. In book: *Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures, Studies in Systems, Decision and Control*. Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing, 2017, vol. 74, pp. 43-65. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7_3
9. Drozd J., Drozd A., Antoshchuk S., Kushnerov A., Nikul V. Effectiveness of Matrix and Pipeline FPGA-Based Arithmetic Components of Safety-Related Systems. *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology*

and Applications. Warsaw, Poland, 2015, pp. 785-789. <http://dx.doi.org/10.1109/IDAACS.2015.7341410>

10. Drozd A. V., Drozd Yu. V., Sulima Yu. Yu., Nikul V. V. Perspectives in the use of bitwise pipelining in the components of safety-related systems. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2018, no. 28 (104), pp. 186-192. (Rus)

11. Shum W., Anderson, J.H. FPGA Glitch Power Analysis and Reduction. *International Symposium on Low power electronics and design (ISLPED)*, 2011, pp. 27-32.

12. Vikas D. A review on glitch reduction techniques. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, vol. 3(2), pp. 145-148.

13. Drozd M., Drozd A. Safety-Related Instrumentation and Control Systems and a Problem of the Hidden Faults. *Proceedings of the 10th International Conference on Digital Technologies*. Zhilina, Slovak Republic, 2014, pp. 137-140. <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2014.6868692>

14. Panato A., Silva S., Wagner F. et al. Design of Very Deep Pipelined Multiplier for FPGAs. *Proceedings Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition*, Paris, France, 2004. <http://dx.doi.org/10.1109/DATE.2004.1269200>

15. Cadenas O., Megson G. A clocking technique for FPGA pipelined designs. *Journal of System Architecture*, 2004, vol. 50, iss. 11, pp. 687-696. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2004.04.001>

16. Wojko M. Pipelined multipliers and FPGA architecture. In: Lysaght P., Irvine J., Hartenstein R. (Eds) *Field*

Programmable Logic and Applications. FPL 1999. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1673, Springer, Berlin, Heidelberg, 1999. https://doi.org/10.1007/978-3-540-48302-1_36

17. Abramovici M., Breuer M. A., Friedman A. D. *Digital Systems Testing and Testable Design*. Wiley-IEEE Press, New York, 1990, 652 p.

18. Mel'nyk A. O. *Arkhitektura komp'yutera*. Naukove vydannya [Architecture of the computer. Scientific publication]. Luts'k, Volyn's'ka oblasna drukarnya, 2008, 470 p. (Ukr)

19. Drozd A., Sitnikov V. An online testing method for a digit by digit pipeline multiplier with truncated calculations. *Proc. East-West Design&Test Conference*, Yalta—Alushta, Ukraine, 2004, pp. 76-82.

20. *Cyclone II Architecture. Cyclone II Device Handbook Version 3.1*. Altera Corporation, 2007. Available at: http://www.altera.com/literature/hb/cyc2/cyc2_cii51002.pdf

21. *Using TimeQuest Timing Analyzer*. Altera Corporation – University Program, 2013. available at: ftp://ftp.altera.com/up/pub/Intel_Material/13.0/Tutorials/Timequest.pdf

22. *PowerPlay Power Analysis. Quartus II Handbook Version 13.1.0*. Altera Corporation. 2013. Available at: http://www.altera.com/literature/hb/qts/qts_qii53013.pdf

23. Drozd O. V. et al. *Prystriy dlya mnozhennya N-rozryadnykh chisel* [A device for multiplying N-bit numbers]. Patent no. 117062 Ukr, 2018. (Ukr)

Описание статьи для цитирования:

Никул В. В., Дрозд А. В., Дрозд Ю. В., Озеранский В. С. Эффективность поразрядной конвейеризации вычислений в FPGA-компонентах систем критического применения. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 4, с. 3-13. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.03>

Cite the article as:

Nikul V. V., Drozd A. V., Drozd J. V., Ozeransky V. S. Efficiency of the computation bitwise pipelining in FPGA-based components of safety-related systems. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 4, pp. 3-13. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.03>

НОВІ КНИГИ

НОВІ КНИГИ

Матвійків М. Д., Вус Б. С., Матвійків Т. М., Вус М. Б. Технологія виготовлення електронних пристроїв.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017.

Викладено основні відомості про сучасні та перспективні технології виготовлення функціональних та функціонально-програмованих електронних пристроїв. Розглянуто технології складових частин електронних пристроїв: електронних модулів, механічних компонентів та ін. Також викладено основні вимоги до складання, програмування, тестування, регулювання, налаштування та операційного контролю електронних пристроїв.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом “Електронні апарати”, та фахівців, які проєктують, виготовляють або обслуговують різноманітну електронну техніку в галузях авіоники, біомедичної і побутової техніки тощо.



К. ф.-м. н. А. В. ИВАНЧЕНКО, С. В. МАЗУРИК, д. ф.-м. н. А. С. ТОНКОШКУР

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ПРИ ПЕРЕГРЕВЕ

Приведены результаты исследований вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик монокристаллических кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей, прошедших термообработку при повышенной температуре (до 150°C) в течение различного времени (до 6 ч) при освещении и в темновом режиме в разомкнутой и короткозамкнутом состоянии. В исследованных температурном и временном диапазонах не обнаружено значительных изменений основных функциональных характеристик и параметров.

Ключевые слова: кремниевый фотоэлектрический преобразователь, солнечная батарея, вольт-амперная характеристика, вольт-ваттная характеристика, термообработка.

В последнее время солнечные батареи становятся одним из наиболее предпочитаемых источников возобновляемой электрической энергии, а значит, растут требования к их надежности, в частности к сохранению основных функциональных свойств после пребывания при повышенной температуре.

Как известно, структурно солнечные батареи состоят из множества последовательно и параллельно соединенных фотоэлектрических преобразователей (**ФЭП**), основной частью которых зачастую является кремниевый $p-n$ -переход. Как свидетельствуют данные, представленные в [1, 2], ряд других устройств использующих кремниевые переходы (диоды, транзисторы) сохраняют свою работоспособность до температуры порядка 150°C и выше. Тем не менее, для аналогичных кремниевых приборов, используемых в качестве ФЭП в солнечной энергетике, максимальная температура эксплуатации ограничивается 60–80°C [3] по причине резкого снижения выделяемой мощности [4–6]. Однако до настоящего времени вопрос об уровне деградации и сохранности элемента ФЭП после воздействия относительно высокой температуры в течение ограниченного промежутка времени представляется недостаточно исследованным. Среди известных работ в этом направлении следует отметить [6, 7], где установлено снижение напряжения холостого хода и тока короткого замыкания кремниевых ФЭП после термической обработки разной длительности при температуре около 300°C в атмосферных условиях.

Следует также отметить необходимость подобных исследований для решения задачи по-

вышения надежности солнечных батарей путем использования самовосстанавливающихся РРТС-предохранителей (polymeric positive temperature coefficient device) типа Polyswith в качестве дополнительных устройств, предназначенных для изоляции неактивных (затененных или дефектных) областей как отдельных ФЭП, так и их модулей [8, 9]. Эти элементы электрической и тепловой защиты нашли уже применение в аккумуляторах и гальванических источниках питания [10–13]. Одной из проблем их применения в солнечных батареях является несоответствие диапазонов рабочей температуры фотоэлектрических модулей (максимальная регламентируемая температура составляет 80°C [3]) и наиболее распространенных в настоящее время типов коммерческих РРТС-предохранителей, для которых область фазового перехода (срабатывания) находится около 125°C [9–11].

В настоящей работе исследовалась одна из важных проблем, возникающих при разработке схемотехнических устройств защиты элементов солнечных батарей от электротепловых перегрузок — влияние перегрева фотоэлектрических преобразователей на их функциональные свойства.

Образцы для исследований и методика проведения эксперимента

Исследовали образцы ФЭП из монокристаллического кремния КДБ-10 с просветляющим покрытием на основе ИТО [9, 14]. Для измерения вольт-амперной и вольт-ваттной характеристик использовалась известная измерительная схема вольтметра-амперметра [15]. Источником света

служил имитатор солнечного излучения, моделирующий условия АМ1,5. Для исследований воздействия на ФЭП повышенной температуры прибор помещался в разогретый термостат, а после каждой термообработки охлаждался до комнатной температуры в свободном режиме.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) ФЭП, прошедших термообработку при различной температуре, проводили в темновом и световом режимах для разомкнутого и короткозамкнутого состояний преобразователя. На основе полученных ВАХ рассчитывали соответствующие вольт-ваттные характеристики (ВВХ). В результате фиксировали значения основных параметров ВАХ и ВВХ фотоэлектрических преобразователей, такие как напряжение холостого хода (при разомкнутом ФЭП) V_{OC} , ток короткого замыкания I_{SC} и максимальная электрическая мощность P_{max} , отдаваемая во внешнюю цепь. Полученные результаты оформляли в виде корреляционных полей, где в качестве независимого фактора x выступали значения температуры ($T_{ТО}$) или продолжительности ($t_{ТО}$) термообработки, а случайной величины y — значения параметров V_{OC} , I_{SC} , P_{max} . Эти данные представляли также аппроксимирующими линейными зависимостями, полученными с использованием метода наименьших квадратов.

Для анализа результатов использовалась методика, аналогичная применяемой для оценки стабильности варисторных изделий и основанная на фиксации отклонений их функциональных параметров от номинальных значений вследствие старения или воздействия различных термообработок [16, 17].

Контролируемая величина, называемая уходом соответствующего параметра y , определялась по общей формуле

$$\Delta y(x) = \frac{y(x) - y(0)}{y(0)} \cdot 100\%,$$

где $y(0)$, $y(x)$ — соответственно, начальное (номинальное) значение параметра y и его значение, полученное для условий, определяемых величиной x .

В качестве $y(0)$ принималось значение $y^*(0)$, полученное путем аппроксимации.

Влияние температуры термической обработки на характеристики ФЭП

Для проведения анализа были измерены ВАХ и ВВХ образцов ФЭП, прошедших термообработку длительностью 10 мин при различных зна-

чениях температуры, режимах освещения и состояниях выводов.

Было установлено, что термообработка ФЭП в короткозамкнутом состоянии и освещенном режиме приводит к некоторому «дрейфу» ВАХ и ВВХ, который носит характер случайного разброса (рис. 1). В частности, может иметь место и ухудшение, и улучшение параметров ФЭП, соответствующие известным процессам их деградации и регенерации [18, 19].

Для проведения анализа также были построены зависимости напряжения холостого хода V_{OC} и тока короткого замыкания I_{SC} , приведенные к их начальным значениям, полученным путем аппроксимации (соответственно, V_{OC}^* и I_{SC}^*), от температуры термообработки ФЭП для разных режимов освещения и состояний выводов. Как видно из рис. 2, независимо от значения температуры, режима освещения и состояния ФЭП, термообработка практически не влияет на величину V_{OC} . Об этом свидетельствуют и данные, приведенные в таблице для температуры 150°C.

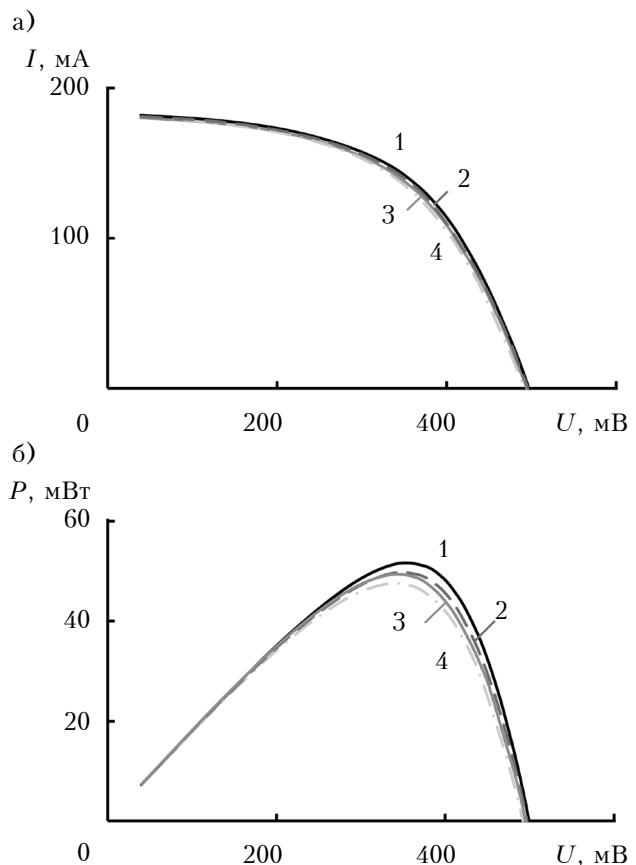


Рис. 1. Типичные ВАХ (а) и ВВХ (б) ФЭП, прошедших термообработку длительностью 10 мин в освещенном режиме и короткозамкнутом состоянии при различной температуре (°C):

1 — 25; 2 — 75; 3 — 120; 4 — 165

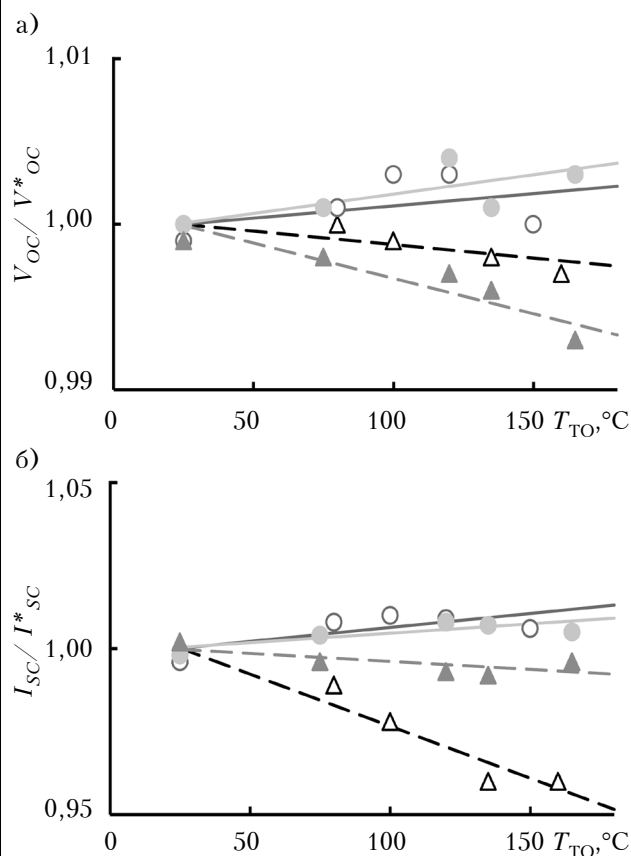


Рис. 2. Зависимости напряжения холостого хода (а) и тока короткого замыкания (б) ФЭП от температуры термообработки длительностью 10 мин, проведенной для различных режимов освещения и состояний выводов:

●, ▲ — световой режим; ○, △ — темновой режим;
 ○, △ — разомкнутое состояние; ▲, △ — короткозамкнутое состояние
 (линии — аппроксимация с использованием метода наименьших квадратов)

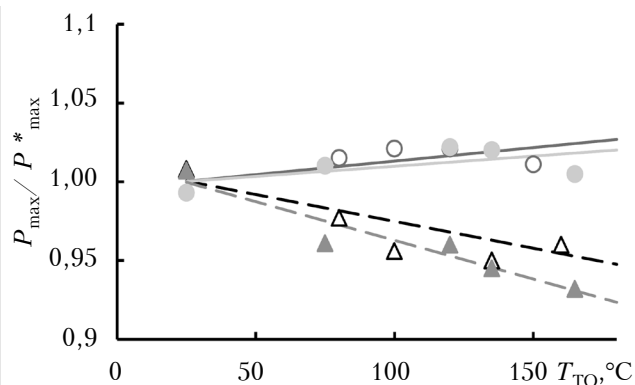


Рис. 3. Зависимость максимальной мощности, отдаваемой ФЭП, от температуры термообработки длительностью 10 мин, проведенной для различных режимов освещения и состояний выводов ФЭП (обозначения такие же, как и на рис. 2)

Величина тока короткого замыкания I_{SC} (как и значение тока при любом фиксированном напряжении, см. рис. 1), характеризуется большим разбросом значений, особенно если термообработка производилась в темновом режиме. Тем не менее, значения ΔI_{SC} (150°C) не превышают 5%. Следует обратить внимание, что уход ΔI_{SC} в темновом режиме в основном больше, чем в световом. Это согласуется с данными об эффекте регенерации фотоэлектрических свойств исследуемых ФЭП при термообработке (термоотжиге) при освещении [18, 19]. Поскольку значения максимальной мощности ФЭП непосредственно связаны с величиной тока ФЭП, аналогичные закономерности проявляются и в зависимости $P_{max}(T_{TO})$ (рис. 3, таблица).

Влияние факторов термообработки, таких как температура (диапазон от 25 до 150°C) и длительность (до 6 ч), на основные функциональные параметры исследованных ФЭП

| Фактор влияния | Режим освещения и состояние ФЭП при термообработке | Максимальный уход параметра, % | | |
|--|--|--------------------------------|-----------------|------------------|
| | | ΔV_{OC} | ΔI_{SC} | ΔP_{max} |
| Температура термообработки ($t_{TO} = 10$ мин) | темновой / разомкнутое | 0,23 | 1,052 | 2,148 |
| | световой / разомкнутое | 0,301 | 0,709 | 1,613 |
| | темновой / короткозамкнутое | -0,204 | -3,921 | -4,264 |
| | световой / короткозамкнутое | -0,534 | -0,604 | -6,145 |
| Длительность термообработки ($T_{TO} = 150^\circ\text{C}$) | темновой / разомкнутое | -0,791 | 3,377 | 3,279 |
| | световой / разомкнутое | -0,16 | 3,937 | -1,116 |
| | темновой / короткозамкнутое | -0,626 | -4,753 | -3,823 |
| | световой / короткозамкнутое | 0,032 | 2,534 | -1,329 |

Влияние продолжительности термической обработки на характеристики ФЭП

Для проведения анализа были измерены ВАХ и ВВХ образцов ФЭП, прошедших термообработку при температуре 150°C различной длительности (до 6 ч) в различных режимах освещения и состояниях выводов. Результаты аналогичны полученным при исследовании влияния температуры термообработки.

Было установлено, что термообработка в разомкнутом состоянии выводов ФЭП и темновом режиме, приводит к случайному «дрейфу» характеристик (рис. 4), величина V_{OC} практически постоянна, а параметры I_{SC} и P_{max} имеют случайный разброс после термообработки в любых условиях (рис. 5, 6). Значения ухода параметров, приведенные в таблице, не превышают 5% и, таким образом, могут рассматриваться как свидетельство отсутствия корреляционных связей между соответствующими величинами.

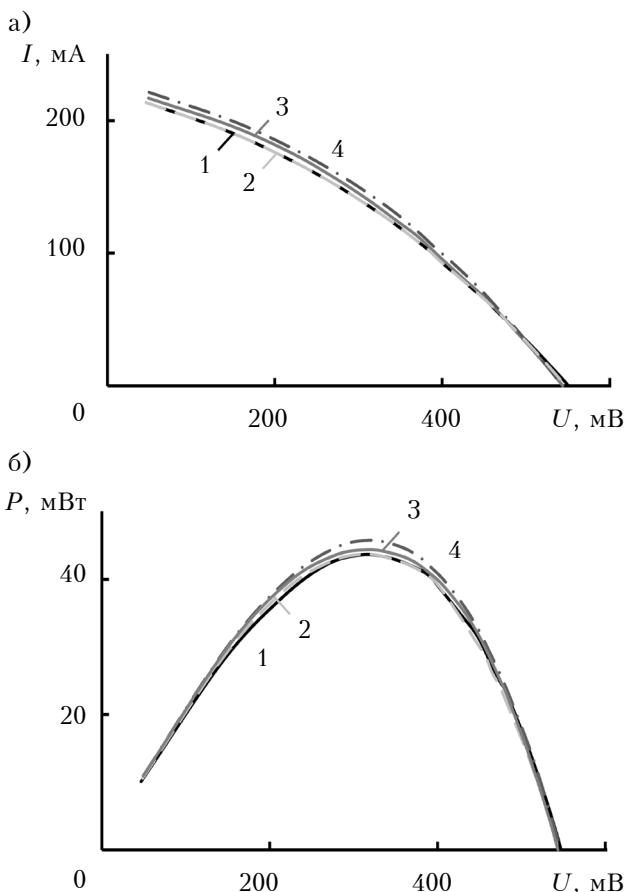


Рис. 4. Типичные ВАХ (а) и ВВХ (б) ФЭП, прошедших термообработку при температуре 150°C в темновом режиме и разомкнутом состоянии выводов в течение различного времени (мин):
1 – 0; 2 – 60; 3 – 180; 4 – 360

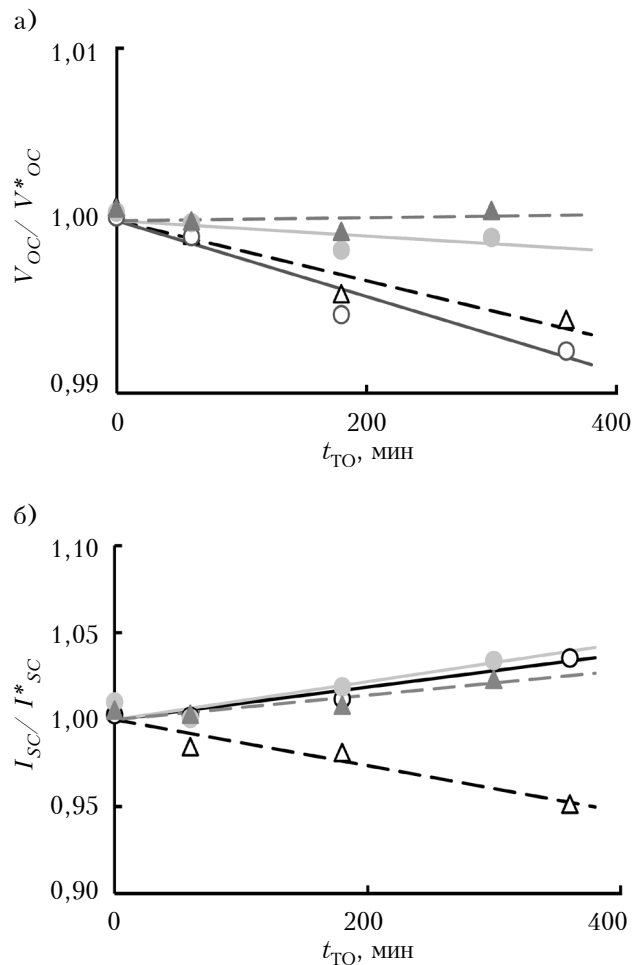


Рис. 5. Зависимости напряжения холостого хода (а) и тока короткого замыкания (б) ФЭП от длительности термообработки, проведенной при температуре 150°C для различных режимов освещения и состояний выводов (обозначения такие же, как и на рис. 2)

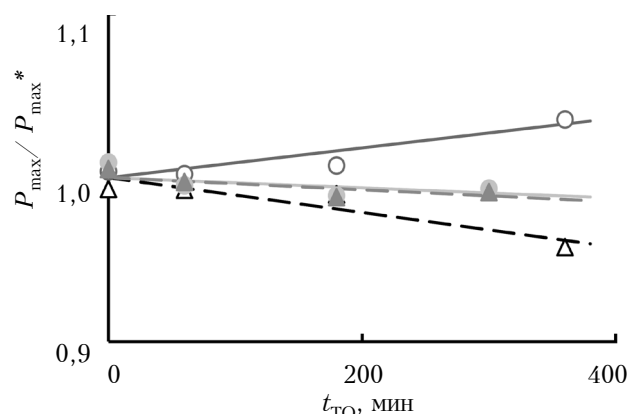


Рис. 6. Зависимость максимальной мощности, отдаваемой ФЭП, от длительности термообработки t_{TO} , проведенной при температуре 150°C для различных режимов освещения и состояний выводов (обозначения такие же, как и на рис. 2)

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования влияния пребывания фотоэлектрических преобразователей на основе монокристаллического кремния солнечных батарей при температурах до 150°C в темновом режиме и при освещении в разомкнутом и короткозамкнутом состояниях в интервале времени до 6 ч показали, что в исследованных температурных и временных диапазонах не обнаруживается значительных изменений основных функциональных характеристик и параметров фотоэлектрических преобразователей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Герасимов В. Г., Князьков О. М., Краснополский А. Е., Сухоруков В. В. Основы промышленной электроники: учебник для неэлектротехнических специальностей вузов. — Москва: Высшая школа, 1986.
2. Электротехника. Часть 1 / Под ред. Ю. Л. Хотунцева. — Москва: Юрайт, 2018.
3. Гудкова А. В., Губин С. В., Белоконов В. И. Термостабилизация фотоэлектрических преобразователей для измерения ВАХ с импульсным источником света // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. — 2012. — N 57. — С. 187–196.
4. Бакиров М. Я. Фотоэлектрические и радиационные характеристики кремниевых солнечных элементов при повышенных освещенностях и температурах // Физика и техника полупроводников. — 1997. — Т. 31, N 5. — С. 520–522.
5. Саченко А. В., Крюченко Ю. В., Костылев В. П. и др. Исследование влияния температуры на характеристики гетеропереходных солнечных элементов на основе кристаллического кремния // Письма в ЖТФ. — 2016. — Т. 42, Вып. 6. — С. 70–76.
6. Radziemska E. Effect of temperature on dark current characteristics of silicon solar cells and diodes // International Journal of Energy Research. — 2006. — Vol. 30, N 2. — P. 127–134. — <https://doi.org/10.1002/er.1113>
7. Flammini M. G., Debernardi N., Le Ster M. et al. The influence of heating time and temperature on the properties of CIGSSe solar cells // International Journal of Photoenergy. — 2016. — Vol. 2016. — Article ID 4089369. — <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4089369>
8. Tonkoshkur A.S., Nakashidze L.V., Lyagushyn S.F. Schemotechnical technologies for reliability of solar arrays // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. — 2018. — Вип. 4(117). — С. 95–107.
9. Тонкошкур А. С., Иванченко А. В., Накашидзе Л. В., Мазурик С. В. Применение самовосстанавливающихся элементов для электрической защиты солнечных батарей // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2018. — № 1. — С. 43–49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.1.43>
10. Гавриков В. Самовосстанавливающиеся РТС-предохранители для защиты от токовых перегрузок // Новости электроники. — 2014. — № 12. — С. 11–15.
11. Каминская Т. П., Домкин К. И. Самовосстанавливающиеся предохранители для автомобильной электроники // Электронные компоненты. — 2008. — № 5. — С. 80–82.
12. Pat. 6608470 USA. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries / J. W. Oglesbee, A. G. Burns. — 19.08.03.
13. Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries [Electronic resource]: Littelfuse, Inc. — 2017. — http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf.pdf
14. Накашидзе Л. В., Кныш Л. И. Методология определения состава и схемных решений солнечных фотоэлектрических установок // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — N 10 (57). — С. 100–104.
15. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. — Москва: Наука, 1985.
16. Тонкошкур А. С., Черненко И. М., Суббота В. Л. Электропроводность варисторной оксидно-цинковой керамики при длительном пропуске электрического тока // Неорганические материалы. — 1995. — Т. 31, N 6. — С. 791–794.
17. Иванченко О. В., Тонкошкур О. С. Електроміграційна модель деградації металооксидних варисторних структур // Український фізичний журнал. — 2012. — Т. 57, N 3. — С. 331–339.
18. Fritz J. M., Zuschlag A., Skorka D. et al. Temperature dependent degradation and regeneration of differently doped mc-Si materials // Energy Procedia. — 2017. — Vol. 124. — P. 718–725. — <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.085>
19. Hallam B., Herguth A., Hamer P. et al. Eliminating light-induced degradation in commercial p-type Czochralski silicon solar cells // Applied Science. — 2018. — Vol. 8(10), N 1. — 19 p. — <https://doi.org/10.3390/app8010010>

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.07 2018 г.

О. В. ИВАНЧЕНКО, С. В. МАЗУРИК, О. С. ТОНКОШКУР

Україна, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНІЄВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ПРИ ПЕРЕГРІВАХ

Останнім часом сонячні батареї стають одним з найбільш бажаних джерел відновлюваної електричної енергії, а отже зростають вимоги до їхньої надійності, зокрема до збереження основних функціональних

властивостей після перебування за підвищених температур. У даній роботі досліджувалося одне з важливих питань, що виникають при розробці схемотехнічних пристроїв захисту елементів сонячних батарей від електротеплових перевантажень — вплив перегріву фотоелектричних перетворювачів на їх функціональні властивості.

Наведено результати досліджень вольт-амперних і вольт-ватних характеристик монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячних батарей, які пройшли термообробку за підвищеної температури (до 150°C) протягом різного часу (до 6 год) за умов освітлення і в темновому режимі в розімкненому та короткозамкненому станах. У досліджених температурному та часовому діапазонах не було виявлено значних змін основних функціональних характеристик і параметрів.

Ключові слова: кремнієвий фотоелектричний перетворювач, сонячна батарея, вольт-амперна характеристика, вольт-ватна характеристика, термообробка.

DOI: 10.15222/TKEA2018.4.14
UDC 621.31

A. V. IVANCHENKO, S. V. MAZURIK, A. S. TONKOSHKUR

Ukraine, Oles Honchar Dnipro National University
E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTOVOLTAIC CONVERTERS OF SOLAR BATTERIES IN CASE OF OVERHEATING

Recently, solar panels have become one of the most desirable sources of renewable electrical energy, and thus the requirements for their reliability, in particular to maintain the basic functional properties at elevated temperatures, are increasing. The basic element of solar batteries is photovoltaic converter. Until now, the degree of degradation and ways to protect photovoltaic converters during overheating corresponding to real situations during their exploitation, are not sufficiently studied.

In this paper, the authors study one of the important problems arising during the development of circuit-technical devices for the protection of the photovoltaic converters against electrothermal overloads, namely, the problem of the effect of overheating of photovoltaic converters on their functional properties. Primarily, this is important in connection with the perspective of using functional electronics to improve the reliability of the photovoltaic system of the solar battery. In particular, resettable fuses based on polymeric nanocomposites with carbon fillers are such elements of the electronics. One of the difficulties of direct application of the resettable fuses is that they have a switching temperature that exceeds the standard operating temperature range of the modern photovoltaic converters.

The paper presents investigations results of the current-voltage and volt-watt characteristics of the single-crystal silicon photovoltaic converters of the solar batteries, which have undergone heat treatment at elevated temperature (up to 150°C) at different time intervals (up to 6 hours) under lighting conditions and in dark mode in open- and short-circuited states.

The method based on fixing the deviations of the functional parameters (i.e., open-circuit voltage, short-circuit current and maximum power) of the converters from their nominal values was used for their analysis.

It has been established that in the investigated temperature and time ranges there are no significant changes of the main functional characteristics and parameters of the photovoltaic converters based on single-crystal silicon.

Keywords: silicon photovoltaic converters, solar battery, current-voltage characteristics, volt-watt characteristics, heat treatment.

REFERENCES

1. Gerasimov V. G., Knyaz'kov O. M., Krasnopol'skiy A. Ye., Sukhorukov V. V. *Osnovy promyshlennoy elektroniki: uchebnik dlya neelektrotekhnicheskikh spetsial'nostey vuzov* [Fundamentals of industrial electronics: textbook for non-electrical specialties of higher education institutions]. Moscow, Vysshaya shkola, 1986, 336 p. (Rus)
2. Elektrotekhnika. Chast' 1: *uchebnoye posobiye dlya srednego professional'nogo obrazovaniya* [Electrical engineering. Part 1: textbook for secondary professional education]. Ed. by Yu. L. Khotuntsev, Moscow, Yurayt, 2018, 243 p. (Rus)
3. Gudkova A. V., Gubin S. V., Belokon' V. I. [Thermal stabilization of solar cells for current-voltage characteristics measurement with the pulsed light source]. *Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii*, 2012, no. 57, pp. 187-196. (Rus)
4. Bakirov M. Ya. [Photoelectric and radiation characteristics of silicon solar elements under elevated illuminations and temperatures]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1997, vol. 31, no. 5, pp. 520-522. (Rus)
5. Sachenko A. V., Kryuchenko Y. V., Kostilyov V. P et al. [The temperature dependence of the characteristics of

crystalline-silicon-based heterojunction solar cells]. *Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, iss. 3, pp. 313-316. <https://doi.org/10.1134/S1063785016030305>

6. Radziemska E. Effect of temperature on dark current characteristics of silicon solar cells and diodes. *International Journal of Energy Research*, 2006, vol. 30, no. 2, pp. 127-134. <https://doi.org/10.1002/er.1113>

7. Flammini M. G., Debernardi N., Le Ster M., Dunne B., Bosman J., Theelen M. The influence of heating time and temperature on the properties of CIGSs solar cells. *International Journal of Photoenergy*, 2016, Vol. 2016, Article ID 4089369. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4089369>

8. Tonkoshkur A.S., Nakashidze L.V., Lyagushyn S.F. Schemotechnical technologies for reliability of solar arrays. *Sistemi tekhnologii. Regional'nyy sbornik nauchnykh trudov*, 2018, iss. 4(117), pp. 95-107.

9. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashidze L. V., Mazurik S. V. [Application of resettable elements for electrical protection of solar batteries]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2018, no. 1, pp. 43-49. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.1.43> (Rus)

10. Gavrikov V. [Self-healing PTC fuses for protection of current overload]. *Novosti elektroniki*, 2014, no. 12, pp. 11-15. (Rus)

11. Kaminskaya T. P., Domkin K. I. [Self-healing fuses for automotive electronics]. *Elektronnyye komponenty*, 2008, no. 5, pp. 80-82. (Rus)

12. Pat. 6608470 USA. *Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries*. J. W. Oglesbee, A. G. Burns. 19.08.03.

13. *Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries* [Electronic resource]: Littelfuse, Inc. 2017. http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf.pdf

14. Nakashidze L. V., Knysh L. I. [Methodology for determining the composition and circuit design of solar photovoltaic equipments]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2008, no. 10 (57), pp. 100-104. (Rus)

15. Koltun M. M. *Optika i metrologiya solnechnykh elementov* [Optics and metrology of solar elements]. Moskva, Nauka, 1985, 280 p. (Rus)

16. Tonkoshkur A. S., Chernenko I. M., Subbota V. L. [Long-term effects of electric current on the conductivity of zinc oxide varistor ceramics]. *Neorganicheskiye materialy*, 1995, vol. 31, iss. 6, pp. 730-733. (Rus)

17. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Electromigration degradation model of metal oxide varistor structures. *Ukrainian Journal of Physics*, 2012, vol. 57, iss. 3, pp. 330-338.

18. Fritz J. M., Zuschlag A., Skorka D., Schmid A., Hahn G. Temperature dependent degradation and regeneration of differently doped mc-Si materials. *Energy Procedia*, 2017, vol. 124, pp. 718-725. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.085>

19. Hallam B., Herguth A., Hamer P et al. Eliminating light-induced degradation in commercial p-type Czochralski silicon solar cells. *Applied Science*. 2018, vol. 8(10), no. 1, 19 p. <https://doi.org/10.3390/app8010010>

Описание статьи для цитирования:

Иванченко А. В., Мазурик С. В., Тонкошкур А. С. Исследование характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей при перегреве. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 4, с. 14-20. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.14>

Cite the article as:

Ivanchenko A. V., Mazurik S. V., Tonkoshkur A. S. Investigation into the characteristics of silicon photovoltaic converters of solar batteries in case of overheating. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2018, no. 4, pp. 14-20. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.14>

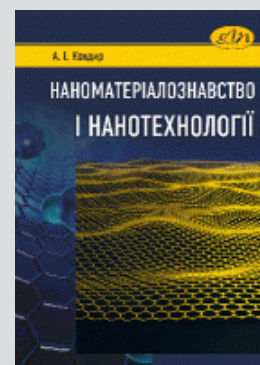
НОВІ КНИГИ

НОВІ КНИГИ

Кондир А. І. Наноматеріалознавство і нанотехнології.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016.

Викладено фізичні, матеріалознавчі і технологічні основи отримання широкого класу наноматеріалів на органічній, неорганічній та біологічній основах. Розглянуто способи виробництва наноматеріалів. Наведено методи дослідження нанооб'єктів та будову найпоширеніших нині наноматеріалів. Визначено галузі застосування наноматеріалів.

Буде корисним для студентів фізико-технічних та інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.



К. ф.-м. н. О. А. АБДУЛХАЕВ, д. т. н. Д. М. ЁДГОРОВА, д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ,
А. А. ЯКУБОВ, Ш. М. КУЛИЕВ

Узбекистан, г. Ташкент, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз

E-mail: karimov@uzsci.net

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХБАРЬЕРНОЙ ФОТОДИОДНОЙ GaAs-СТРУКТУРЫ

Приведены результаты исследования механизма токопереноса и спектральной фоточувствительности трехбарьерной фотодиодной структуры $m_1-p\text{GaAs}-n\text{GaAs}-m_2$ с эффектом смыкания двух смежных переходов, которая при обеих полярностях включения обладает высокой фоточувствительностью в «примесной» области спектра. Полученные результаты указывают на перспективность данных структур для применения в оптических системах связи.

Ключевые слова: трехбарьерная фотодиодная структура, эффект смыкания, механизм токопереноса, фоточувствительность.

В настоящее время оптическая передача сигналов начинает вытеснять способы передачи информации с помощью электрических сигналов. Оптические методы передачи отличаются высокой помехоустойчивостью, большой скоростью передачи данных, возможностью передачи различных данных по одному кабелю. Прием и передача оптических сигналов осуществляется с помощью основных элементов — излучающего лазера или светодиода, светового волокна, а также приемника на основе фотодиода. Бурное развитие волоконно-оптических систем передачи информации обусловлено систематическим совершенствованием оптических волокон и оптических усилителей, что в свою очередь требует разработки соответствующих излучателей и фотоприемников [1]. Однако, хотя существующие принципы образования фототоков, а также виды приемников излучения и отличаются разнообразием, они все же не могут полностью удовлетворить возрастающие требования к фоточувствительности и спектральному диапазону. Для повышения эффективности приемников излучения разрабатываются различные модифицированные полупроводниковые структуры. Относительно фоточувствительности фоторезисторных структур [2] можно отметить, что за счет фотогенерации избыточных электронов и дырок в объеме полупроводника под воздействием света реализуется физический принцип фотопроводимости. Для этого должны быть выполнены следующие условия:

— для достижения относительного изменения сопротивления структуры не менее 10% длина образца должна быть как минимум в четыре раза больше диффузионной длины неосновных носителей заряда [3], поскольку иначе изменение сопротивления, определяемое темновым током, при освещении будет незначительным;

— наличие электрического поля в области линейного участка вольт-амперной характеристики;

— интенсивность возбуждающего сигнала должна быть меньше критической, чтобы люкс-амперная характеристика не выходила за пределы линейной области.

Проявляющиеся при этом фотоэффекты могут быть вызваны собственным или примесным поглощением, обусловленным переходами «зона — зона» или «примесный уровень — зона проводимости», «валентная зона — примесный уровень». То есть кванты света при поглощении могут перебрасывать электроны от атомов самого полупроводника или с примесных атомов. Эффект фотопроводимости ослабляется с увеличением уровня легирования полупроводников, а также с уменьшением толщины базовой области. Кроме того, фотодиод обладает большим быстродействием, чем фототранзистор [4].

В [5] при изготовлении лавинных $p-i-n$ фотодиодов для уменьшения темнового тока было использовано охранный кольцо, препятствующее достижению $p-n$ -перехода носителями заряда, генерированными на периферии кристалла. Однако при этом авторам работы не удалось решить другую проблему — уменьшить емкости структуры (<130 пФ). В [6] для уменьшения емкости фотодиода была изготовлена по-

*Работа выполнена при поддержке проекта
ФА-Ф-5-020*

лупроводниковая пластина с гетероструктурой GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с разделенными чувствительной (диаметром 50 мкм) и контактной мезами, соединенными мостиковым фронтальным контактом. Автором [7] проведен обзор работ по лавинным $p-i-n$ -фотодиодам на основе многослойных InGaAs-структур, которые рассчитаны на спектральный диапазон 1300 и 1550 нм, и показано, что здесь тоже остается нерешенной проблема снижения темновых токов.

В отличие от лавинных диодов, в многобарьерных структурах эти проблемы можно решить подбором параметров базовой области (более высокоомной) и выпрямляющего перехода, а также их конструкции. В этом аспекте представляет интерес создание многобарьерных фоточувствительных структур с интегрированными в единую структуру металлополупроводниковым и выпрямляющим переходами, что способствует повышению быстродействия и частотного диапазона.

В случае двухбарьерных структур база, являясь единственной при смене полярности рабочего напряжения, преимущественно модулируется поочередно сначала с одной стороны — в направлении от p -области к n -области, а затем с другой — от металла к n -области.

В [8] была показана возможность увеличения фоточувствительности планарных структур с двумя встречно включенными потенциальными барьерами Бардина по сравнению с диодными структурами. Они изготавливались на эпитаксиальном слое GaAs толщиной 10–14 мкм, выращенном на подложках из полупроводникового арсенида галлия. Расстояние между контактами равнялось 100 мкм. В качестве металла для барьера использовался алюминий. Фоточувствительность структуры увеличивалась с ростом рабочего напряжения и при 20 В достигала 1,5 А/Вт. Механизм наблюдаемого внутреннего усиления фототока объясняется образованием неоднородного распределения электрического поля и разделением генерированных светом носителей вблизи анода при одновременной дополнительной эмиссии электронов из катода.

В случае последовательно соединенного третьего барьера структура становится двухбазовой и открывает возможность изучения электронных процессов как при модуляции $p-n$ -переходом одной базы, так и при одновременной модуляции обеих баз барьерами «металл — полупроводник». Кроме того, в режиме запирающего барьера Шоттки чувствительными являются обе поверхности. Можно также определить время жизни неосновных носителей заряда — электронов и дырок, поочередно освещая соответствующую

поверхность, что представляет интерес для объяснения физических особенностей электронных процессов в области объемного заряда многослойных структур.

Настоящая работа посвящена изучению физических особенностей электронных процессов, протекающих в области объемного заряда и в базовой области арсенид-галлиевых трехбарьерных фотодиодных $m_1-p-n-m_2$ -структур при различных режимах включения, а также выявлению механизмов усиления первичного фототока и механизмов спектральной фоточувствительности и токопереноса.

Образцы для исследований и методика эксперимента

Исследуемые трехбарьерные фотодиодные структуры создавались на основе GaAs, легированного кислородом по технологии получения резких $p-n$ -переходов, выращиваемых из тонкого раствора-расплава жидкофазной эпитаксией гомослоя p -типа на подложке GaAs n -типа проводимости [9]. Концентрация носителей составляла $7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ в подложке и $(5-7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в выращенном слое толщиной 1–2 мкм. Выпрямляющие переходы выполнялись напылением в вакууме полупрозрачных слоев Ag толщиной примерно 7 нм на обе поверхности.

Полученная фотодиодная структура представляет собой многослойную структуру, в которой центральный $p-n$ -переход заключен между металлческими слоями, создающими выпрямляющий переход «металл — полупроводник», с соответствующими областями объемного заряда W_{m-p} , W_{p-n} и W_{n-m} (рис. 1). В режиме пря-

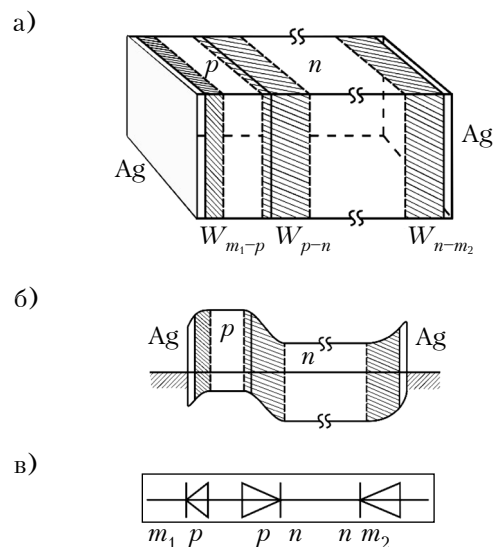


Рис. 1. Геометрическое изображение (а), энергетическая зонная диаграмма в равновесном состоянии (б) и эквивалентная схема (в) трехбарьерной фотодиодной структуры

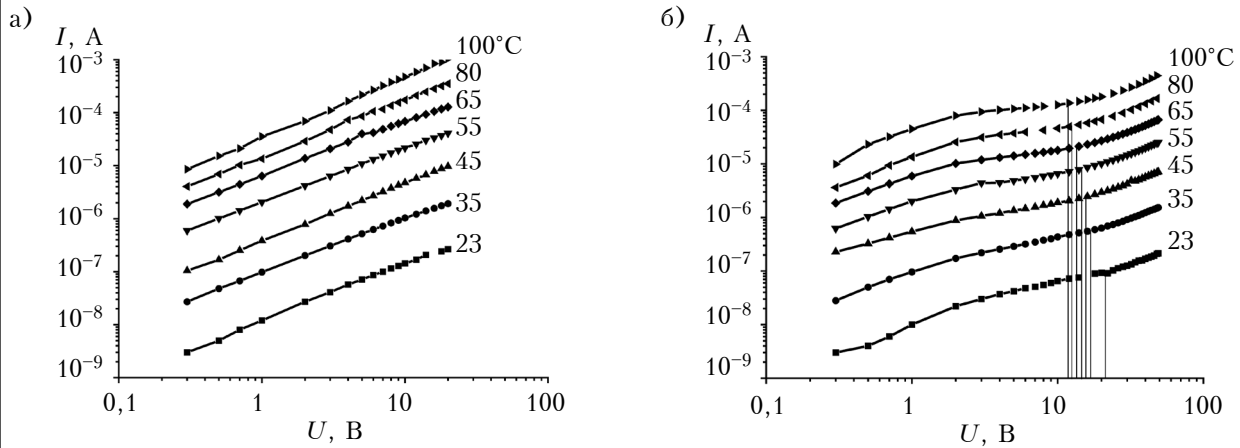


Рис. 3. ВАХ трехбарьерной фотодиодной структуры, полученные при различных значениях температуры и полярности внешнего напряжения:

a — $(+)m_1-p-n-m_2(-)$; *б* — $(-)m_1-p-n-m_2(+)$

ся степенная зависимость тока от напряжения с показателем степени 0,5, который обусловлен преобладанием генерационных процессов над диффузионными. Исследуемая структура, представляя собой три последовательно прямо и обратно соединенных барьера, при любой полярности рабочего напряжения имеет обратно смещенный переход, что приводит к превалированию свойств этого перехода над остальными при повышении рабочего напряжения. Поэтому функциональная зависимость тока от напряжения исследуемых структур также должна быть степенной с показателем степени 0,5, что и наблюдается на начальных участках ВАХ (кривая 2 на рис. 2, *a*). При увеличении напряжения, однако, ВАХ становится линейной, т. е. происходит переход в режим с постоянным омическим сопротивлением, что невозможно объяснить в рамках существующих представлений о барьерах [10].

Необычно также и то, что сопротивление структуры становится меньше при запираании двух крайних барьеров (кривая 1 на рис. 2, *б*). При этом в режиме запираания $p-n$ -перехода на начальном участке при малых значениях напряжения наблюдается снижение сопротивления, которое сменяется линейным ростом до состояния насыщения (кривая 2). Такое поведение зависимости сопротивления исследуемой трехбарьерной структуры от напряжения можно объяснить следующим образом.

В исходном состоянии омическое сопротивление $p-n$ -перехода больше, чем перехода «металл — арсенид галлия», поэтому в режиме прямого смещения $p-n$ -перехода при увеличении прикладываемого внешнего напряжения наблюдается слабое нелинейное уменьшение сопротивления структуры, которое в дальнейшем приобретает неизменное значение. При смене полярности повышение начального напряжения приво-

дит к более ощутимому уменьшению сопротивления структуры, которое затем сменяется практически линейным ростом до 20 В, когда достигается практически постоянная величина, что на ВАХ соответствует линейному увеличению тока через структуру (кривая 2 на рис. 2).

Проведенные температурные исследования ВАХ структур показали, что механизм токопереноса в них не меняется с повышением температуры (рис. 3). Это свидетельствует о том, что причиной наблюдаемых особенностей является не модуляция протяженности базовой области, а изменение сопротивления структуры в «резисторной» области ВАХ, которое описывается как $R_{\Omega}T \sim \exp[f(T^{-1})]$ (рис. 4) и соответствует термоэлектронному механизму токопереноса [10]. В режиме запираания $p-n$ -перехода напряжение в точке излома ВАХ уменьшается при увеличении температуры (см. рис. 3, *б*).

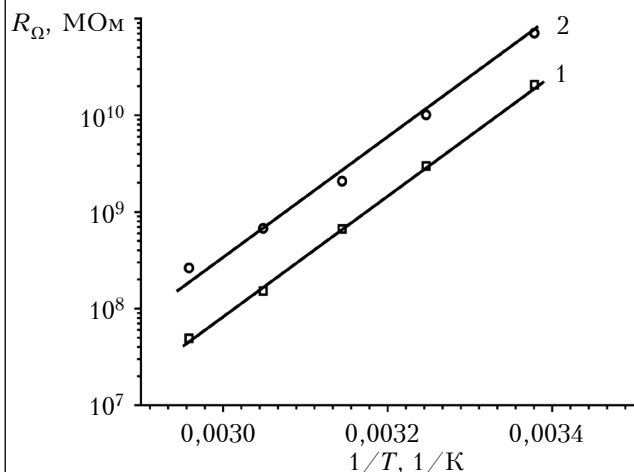


Рис. 4. Зависимость омического сопротивления трехбарьерной фотодиодной структуры от обратной температуры в резисторной области при различной полярности внешнего напряжения:

1 — $(+)m_1-p-n-m_2(-)$; 2 — $(-)m_1-p-n-m_2(+)$

мого смещения $p-n$ -перехода оба выпрямляющих перехода «металл — полупроводник» находятся в режиме запираания, а в режиме запираания $p-n$ -перехода выпрямляющие переходы оказываются включенными в прямом направлении. Обе поверхности являются фотоприемными. Эквивалентная схема фотодиода относительно рабочего напряжения состоит из одного прямо включенного перехода и одного обратно включенного.

Высота потенциальных барьеров, измеренная фотоэлектрическим методом, составляет 0,67 эВ и определяется фиксацией уровня Ферми поверхностными состояниями.

Были изготовлены трехбарьерные структуры $m_1-p\text{-GaAs}-n\text{-GaAs}-m_2$ площадью 2–25 мм², в которых переходы m_1-p и $n-m_2$ физически соединены последовательно, а $p-n$ -переход — встречно. Благодаря существованию запираемого перехода при любой полярности смещения, исследуемые структуры сохраняют работоспособность при смене полярности рабочего напряжения и являются двухсторонне чувствительными, т. е. фототок в них возникает при подсветке любой из сторон. Общая емкость структуры оказывается близкой к величине, определяемой ее геометрическими размерами, и составляет 0,2–0,5 пФ/мм², что почти на порядок меньше по сравнению с известными фотодиодными структурами.

Исследуемая $m_1-p-n-m_2$ -структура модельно аналогична тиристору, но отличается от него большей величиной одной из базовых областей (толщина n -области равна 350 мкм), в то время как в тиристоре три барьера разделены двумя базовыми областями с толщиной порядка диффузионной длины. При этом меньшая величина другой базовой области способствует смыканию смежных переходов до наступления режима лавинного умножения.

Для изучения электронных процессов в многослойных структурах с последовательно расположенными выпрямляющими переходами и слоями объемного заряда были проведены исследования их вольт-амперных (ВАХ), вольт-емкостных и спектральных характеристик. Исследования ВАХ проводили в соответствии с ГОСТ 18986.2-73. Базовая погрешность измерения напряжения составляла 0,05%. Вольт-емкостные характеристики исследуемых диодов измерялись на стандартной установке Л2-7. При малых значениях емкости (пФ) включался высокочастотный генератор, а при больших — низкочастотный. Погрешность измерения составляла 10%.

Токовые характеристики трехбарьерной структуры

Исследуемая структура содержит три перехода: один центральный полупроводниковый $p-n$ -переход и два потенциальных барьера «металл — полупроводник» с большой высотой барьера.

Как показали исследования, измеренные ВАХ несут типичный для структур с тремя последовательно соединенными барьерами характер в области изменения начального напряжения до некоторого порогового значения U_0 , а при его превышении зависимости становятся линейными, что свойственно резисторным структурам (рис. 2, а). При этом следует отметить, что даже в области «резисторной зависимости» проявляются диодные свойства (возникновение фото-эдс, большое сопротивление структуры, малая зависимость емкости от полярности напряжения), что свидетельствует о существовании потенциальных барьеров в данной структуре. Согласно теории, в запираемых переходах арсенид-галлиевых структур должна наблюдаться

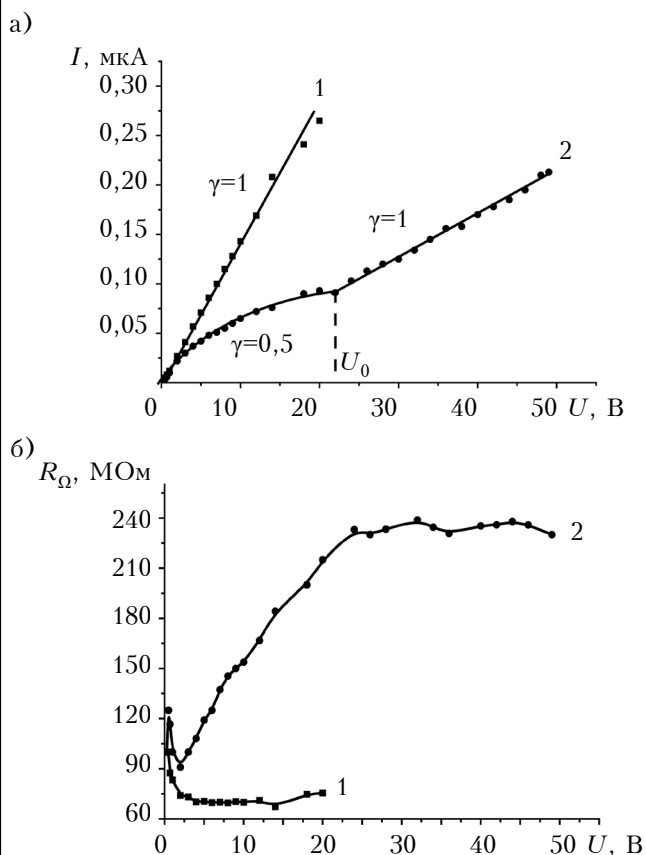


Рис. 2. Зависимости тока I (а) и омического сопротивления R_{Ω} (б) трехбарьерной фотодиодной структуры от напряжения при различной полярности внешнего напряжения:

1 — (+) $m_1-p-n-m_2$ (-); 2 — (-) $m_1-p-n-m_2$ (+)

Заметим, что в исследуемой структуре одна из двух базовых областей p -типа имеет малую толщину, что приводит к смыканию двух смежных переходов при повышении напряжения. Поскольку напряжение смыкания слабо зависит от температуры, можно предположить, что точка излома ВАХ связана со смыканием смежных переходов трехбарьерной структуры с учетом перераспределения потенциала между запираемым $m-p$ -переходом и высокоомной длинной n -областью. Как известно, при смыкании переходов токоперенос через них определяется неосновными носителями, в нашем случае электронами, преодолевающими p -область. Однако в исследуемой структуре их поток ограничивается барьерами «металл — полупроводник», поэтому после смыкания токоперенос через структуру определяется термоэлектронной эмиссией электронов из металла в полупроводниковую область, что и приводит к изменению показателя степени в функциональной зависимости тока от напряжения от 0,5 к 1.

Фотоэлектрические характеристики трехбарьерной структуры

При освещении структуры интегральным освещением зависимость фототока I_{ph} трехбарьерной структуры от напряжения является возрастающей (кривые 1, 2 на рис. 5), в отличие от идеального фотодиода с одним $p-n$ -переходом (сплошная кривая), что связано с внутренним фотоэлектрическим усилением.

Так в режиме прямого смещения $p-n$ -перехода, то есть в условиях запирающего перехода «металл — полупроводник», фототок больше, чем в случае запирающего $p-n$ -перехода.

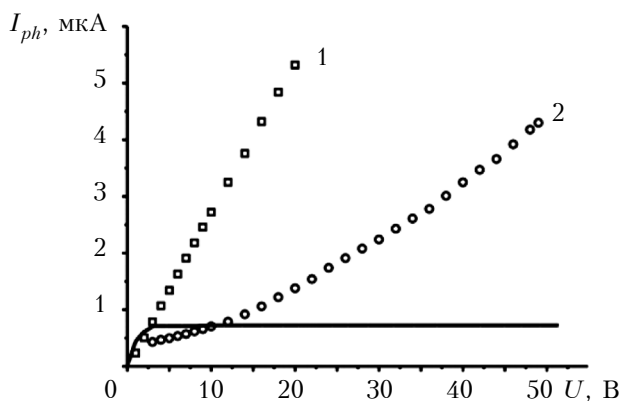


Рис. 5. Зависимость фототока трехбарьерной фотодиодной структуры от напряжения при различной полярности внешнего напряжения:

1 — $(+)m_1-p-n-m_2(-)$; 2 — $(-)m_1-p-n-m_2(+)$
(сплошная линия — зависимость для идеального фотодиода с одним $p-n$ -переходом, ток чувствительность $S_{\phi}^I = 7 \cdot 10^{-2}$ мкА/лк)

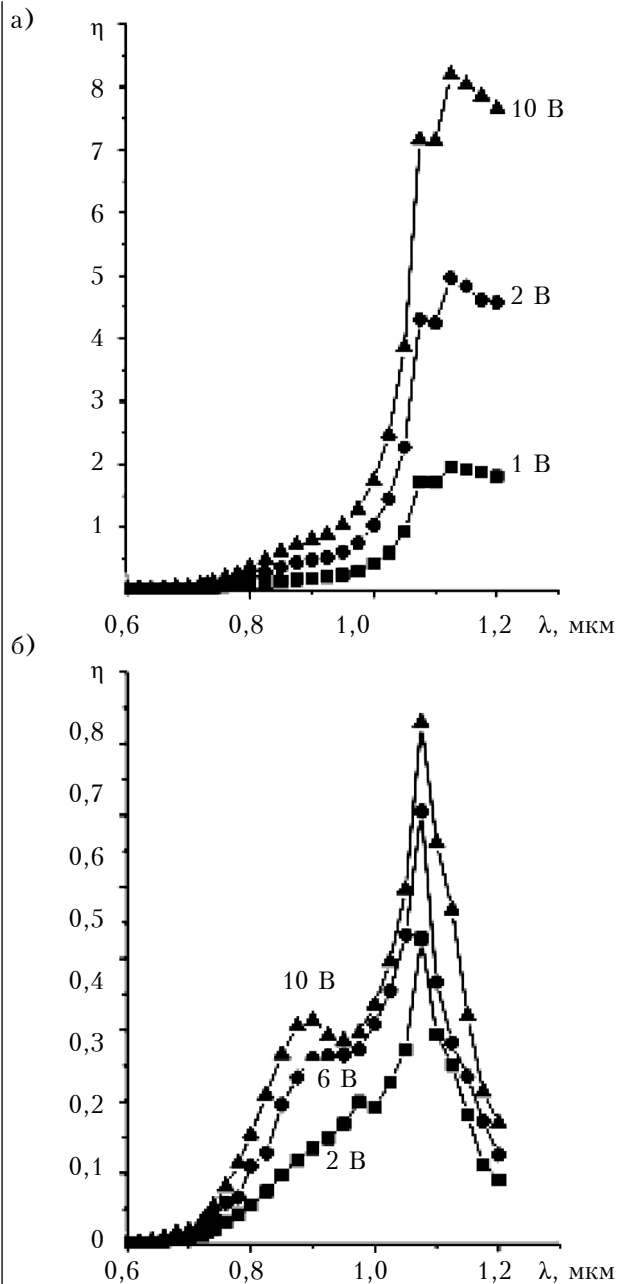


Рис. 6. Спектральные характеристики трехбарьерной фотодиодной структуры при различных значениях внешнего напряжения и его полярности:

а — $(+)m_1-p-n-m_2(-)$; б — $(-)m_1-p-n-m_2(+)$

Квантовая эффективность η исследуемой трехбарьерной фотодиодной структуры, определенная из спектральных характеристик, приведена на рис. 6. Из рисунка видно, что по мере увеличения напряжения от 2 до 10 В в режиме прямого смещения $p-n$ -перехода квантовая эффективность увеличивается примерно до 8 (рис. 6, а), в то время как в режиме запирающего $p-n$ -перехода — лишь до 0,7 (рис. 6, б), что указывает на присутствие внутреннего усиления в первом случае. При этом в режиме прямого смещения спектральная фоточувстви-

тельность достигает максимума в «примесной» области спектра при $\lambda \approx 1,1$ мкм, а в случае за-
пираания $p-n$ -перехода она возрастает в ко-
ротковолновой области спектра до $\lambda \approx 0,9$ мкм,
т. е. в разделении фотоносителей принимают
участие имеющиеся в базовой области примес-
ные уровни кислорода.

Следует отметить, что при определении
квантовой эффективности учитывали чис-
ло падающих фотонов, а не поглощенных.
Соответственно, полученные нами значения
квантовой эффективности являются несколько
заниженными. Несмотря на это, полученное зна-
чение квантовой эффективности больше едини-
цы, что указывает на наличие внутреннего уси-
ления в исследуемой структуре.

Заклучение

Установлено, что в трехбарьерной структу-
ре $m_1-p-n-m_2$ при повышении напряжения
до точки излома вольт-амперной характери-
стики имеет место ограничение дырочного тока, и
ток, протекающий через структуру, определя-
ется генерируемыми в области объемного заря-
да $p-n$ -перехода носителями, а после смыкания
двух смежных переходов токоперенос определя-
ется двухсторонней термоэлектронной эмиссией,
т. е. поток дырок ограничен левым барьером, а
поток электронов — правым. Экспериментально
показано, что арсенид-галлиевая тонкобазовая
трехбарьерная структура благодаря эффекту смы-
кания и наличию высокоомной коллекторной об-
ласти обладает высокой фоточувствительностью,
подобно фоторезисторной структуре, при этом из-
менение сопротивления в ней связано с перерас-
пределением напряжения. Высокий (больше еди-
ницы) внешний квантовый выход свидетельству-
ет о внутреннем усилении первичного фототока.

Высокая чувствительность исследованной
структуры в спектральной области 0,9 и 1,1 мкм
и простота изготовления указывает на перспек-

тивность ее применения в телекоммуникацион-
ных оптических системах как альтернативы тра-
диционным фотоприемникам на основе InGaAs.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Абдулхаев О.А., Ёдгорова Д.М., Каримов А.В.,
Кулиев Ш.М. Высокочувствительный фотоприемник на
основе германиевой двухбарьерной структуры с эффектом
смыкания // Технология и конструирование в электрон-
ной аппаратуре. — 2015. — №4. — С. 24–27.
2. Амброзьяк А. Конструкция и технология полупрово-
дниковых фотоэлектрических приборов. — Москва: Сов.
радио, 1970.
3. Батавин В.В. Контроль параметров полупроводнико-
вых материалов и эпитаксиальных слоев. — Москва: Сов.
радио, 1970.
4. Вартанян С.П. Оптоэлектронные приборы и устройства
в полиграфии. Глава 2. Элементная база оптоэлектронных
приборов и устройств. — Москва: Издательство МГУП, 2000.
(<http://hi-edu.ru/e-books/xbook138/01/part-003.htm>)
5. Добровольский Ю.Г., Ашеулов А.А. Кремниевый
 $p-i-n$ -фотодиод с малым темновым током // Технология
и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. —
№ 3. — С. 27–31.
6. Андреев И. А., Серебренникова О. Ю., Соколовский
Г. С. и др. Быстродействующие фотодиоды для средней
инфракрасной области спектра 1,2–2,4 мкм на основе ге-
тероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с полосой про-
пускания 2–5 ГГц // Физика и техника полупроводни-
ков. — 2013. — Т. 47, вып. 8. — С. 1109–1115.
7. Campbell J. C. Recent advances in telecommunications
avalanche photodiodes // Journal of Light Wave
Technology. — 2007. — Vol. 25, N 1. — P. 109–121. —
<https://doi.org/10.1109/JLT.2006.888481>
8. Ушаков Н.М., Солоцкий А.Н., Ведущ В.Э., Петросян
В.И. Внутреннее фотоусиление в планарных структурах с
барьером Бардина на GaAs // Письма в ЖТФ. — 1990. —
Т. 16, вып. 1. — С. 17–21.
9. Grigoryan G. E., Pogosyan L. N., Khudaverdyan S. Kh.
The creation and investigation of photoelectric features of the
double-barrier structures with narrow recrystallized base // Mater.
of the Conf. on Optoelectronic and Microelectronic
Materials and Devices DEEE. The University of Western
Australia. — 1998. — P. 242–244.
10. Chu J. L., Sze S.M. Microwave Oscillation in pnp
Reach-Through BARITT Diodes // Solid-State Electronics. —
1973. — Vol.16. — P. 85. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(73\)90128-7](https://doi.org/10.1016/0038-1101(73)90128-7)

Дата поступления рукописи
в редакцию 27.04 2018 г.

О. А. АБДУЛХАЙ, Д. М. ЙОДГОРОВА, А. В. КАРИМОВ, А. А. ЯКУБОВ, Ш. М. КУЛИЕВ

Узбекистан, м. Ташкент, Фізико-технічний інститут НВО «Фізика-Сонце» АН РУз

E-mail: karimov@uzsci.net

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЬОХБАР'ЄРНОЇ ФОТОДІОДНОЇ GaAs-СТРУКТУРИ

Роботу присвячено вивченню фізичних особливостей електронних процесів, що протікають в області
об'ємного заряду і в базовій області арсенід-галієвих трьохбар'єрних фотодіодних структур
 $m_1-p-GaAs-n-GaAs-m_2$ за різних режимів включення, а також виявлення механізмів посилення первин-
ного фотоструму і механізмів спектральної фоточутливості і струмопереносу, що представляє інтерес
для використання в оптичних системах. Експериментально показано, що досліджувана структура за-
вдяки ефекту змикання двох суміжних переходів і наявності високоомної колекторної області має ви-
соку фоточутливість, подібно фоторезисторній структурі, при цьому зміна опору в ній пов'язана з
перерозподілом напруги. Високий зовнішній квантовий вихід (більше одиниці) свідчить про внутрішнє по-
силення первинного фотоструму. Експериментально показано, що фоточутливість структури в режимі
прямого зміщення $p-n$ -переходу більше, ніж в режимі його замикання, а максимальна фоточутливість
досягається в «домішковій» області спектра, тобто в розподілі фотоносіїв беруть участь наявні в
базовій області домішкові рівні кисню. Залежність струму від напруги описується ступеневою функцією

з показником ступеня 0,5, відповідним генераційно-рекомбінаційному процесу в області об'ємного заряду $p-n$ -переходу. Отримані результати вказують на перспективність даних структур для застосування в оптичних системах зв'язку.

Ключові слова: трьохбар'єрна фотодіодна структура, ефект змикання, механізм токопереносу, фоточутливість.

DOI: 10.15222/TKEA2018.4.21
UDC 621.315.592.2:546.681'19

O. A. ABDULKHAEV, D. M. YODGOROVA, A. V. KARIMOV,
A. A. YAKUBOV, Sh. M. KULIYEV

Physical-Technical Institute, Scientific Association Physics-Sun,
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
E-mail: karimov@uzsci.net

ELECTROPHYSICAL AND PHOTOELECTRIC CHARACTERISTICS OF A THREE-BARRIER PHOTODIODE GaAs STRUCTURE

The work is devoted to the study of physical features of electronic processes taking place in the space charge region and in the base region of arsenide-gallium three-barrier photodiode structures with the effect of locking two adjacent transitions. The structures have high photosensitivity in the «impurity» region of the spectrum at both inclusion polarities. The obtained results suggest that such structures can be used in optical communication systems. The study allowed showing that a three-barrier photodiode $m_1-p\text{-GaAs}-n\text{-GaAs}-m_2$ -structure with a high quantum efficiency can exceed 8 times the photosensitivity of a photodiode as compared to a photodiode with a single $p-n$ junction. In the $m_1-p\text{-GaAs}-n\text{-GaAs}-m_2$ photodiode structure, the maximum photosensitivity is achieved in the impurity region of the spectrum (above $1.0\text{ }\mu\text{m}$) when excitation of nonequilibrium current carriers through the barrier to the semiconductor, in contrast to the intrinsic spectral region ($0.86\text{ }\mu\text{m}$). It has been shown experimentally that the photosensitivity of the structure in the direct-displacement mode of the $p-n$ junction is larger, compared with the locking mode, and the maximum photosensitivity is achieved in the impurity region of the spectrum. That is, the impurity levels of oxygen present in the base region take part in the separation of the photocarriers. The dependence of the current on the voltage is described by a power function with an exponent of 0.5 corresponding to the generation-recombination process in the space-charge region of the $p-n$ junction.

Keywords: three-barrier photodiode structure, clamping effect, current transfer mechanism, photosensitivity.

REFERENCES

1. Abdulkhaev O.A., Yodgorova D.M., Karimov A.V., Kuliye Sh.M. [High-sensitivity photodetector based on a germanium double-barrier structure with a closing effect]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2015, no 4, pp. 24-27.
2. Ambrozyak A. *Konstruktsiya i tekhnologiya poluprovodnikovyykh fotoelektricheskikh priborov* [The design and technology of semiconductor photovoltaic devices]. Moscow, Sov. Radio, 1970, 392 p. (Rus)
3. Batavin V.V. *Kontrol' parametrov poluprovodnikovyykh materialov i epitaksial'nykh sloyev* [Control parameters of semiconductor materials and epitaxial layers]. Moscow, Sov. Radio, 1976, 102 p. (Rus)
4. Vartanyan S.P. *Optoelektronnyye pribory i ustroystva v poligrafii. Glava 2. Elementnaya baza optoelektronnykh priborov i ustroystv* [Optoelectronic devices and devices in printing]. Moscow, Publishing house MSUP, 2000, 187 p. (<http://hi-edu.ru/e-books/xbook138/01/part-003.htm>) (Rus)
5. Dobrovolskiy Yu. G., Ashcheulov A. A. Silicic $p-i-n$ -photodiode with small dark current. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2011, no. 3, pp. 27-31. (Rus)
6. Andreev I.A., Serebrennikova O.Y., Sokolovskii G.S. et al. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, iss. 8, pp. 1103-1109. <https://doi.org/10.1134/S1063782613080046>
7. Joe C. Campbell. Recent advances in telecommunications avalanche photodiodes. *Journal of Light Wave Technology*, 2007, vol. 25, iss. 1, pp. 109-121. <https://doi.org/10.1109/JLT.2006.888481>
8. Ushakov N.M., Solotsky A.N., Vedus V.E., Petrosyan V.I. [Inner photo intensification in planar structures with a Bardeen barrier on GaAs.] *Pisma v ZhTPh*, 1990, vol. 16, iss. 1, pp.17-21. (Rus)
9. Grigoryan G. E., Pogosyan L. N., Khudaverdyan S. Kh. The creation and investigation of photoelectric features of the double-barrier structures with narrow recrystallized base. Materials of the Conf. on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices DEEE. The University of Western Australia, 1998, pp. 242-244.
10. Chu J. L., Sze S.M. Microwave Oscillation in pnp Reach-Through BARITT Diodes. *Solid-State Electronics*, 1973, Vol.16, pp. 85. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(73\)90128-7](https://doi.org/10.1016/0038-1101(73)90128-7)

Описание статьи для цитирования:

Абдулхаев О. А., Ёдгорова Д. М., Каримов А. В., Якубов А. А., Кулиев Ш. М. Электрофизические и фотоэлектрические характеристики трехбарьерной фотодиодной GaAs-структуры. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, №4, с. 21-27. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.21>

Cite the article as:

Abdulkhaev O.A., Yodgorova D.M., Karimov A.V., Yakubov A.A., Kuliye Sh.M. Electrophysical and photoelectric characteristics of a three-barrier photodiode GaAs structure. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 4, pp. 21-27. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.21>

О. Ю. КУТОВА, М. Г. ДУШЕЙКО, Б. О. ЛОБОДА, Т. Ю. ОБУХОВА

Україна, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: t.y.obukhova@gmail.com

ЗМІНА ПРОВІДНОСТІ СТРУКТУР «ПОРИСТИЙ КРЕМНІЙ З НАНОЧАСТИНКАМИ СРІБЛА — КРЕМНІЙ» ПРИ ДЕТЕКТУВАННІ ПЕРЕКИСУ ВОДНЮ

Досліджено механізми зміни провідності структур «пористий кремній з наночастинками срібла — кремній» найпростіших резистивних сенсорів під впливом перекису водню. Показано, що зміна провідності сенсора під час розкладу перекису водню в присутності наночастинок срібла відбувається за рахунок двох конкуруючих процесів — екстракції електронів з об'єму кремнію у пористий кремній та розігріву структури в результаті реакції розкладу перекису водню.

Ключевые слова: сенсор, перекис водню, пористий кремній, наночастинки срібла.

Широке застосування пористих шарів кремнію для аналізу різноманітних рідин та газів робить актуальним розуміння електрофізичних процесів, які відбуваються при цьому в напівпровідниковій структурі, а також їхній вплив на результати вимірювання. Попри те, що пористий кремній досліджується вже понад 25 років, процеси, які відбуваються в ньому при застосуванні Si як сенсору, досі є не до кінця визначеними.

Детектування перекису водню широко застосовується як у медицині, так і у біотехнологіях, оскільки ця речовина є продуктом протікання багатьох реакцій [1]. Датчики на основі пористого кремнію є дуже перспективними в цій області завдяки низькій вартості та сумісності з кремнієвою технологією [2–4]. Чутливість пористої структури можна додатково покращити, використовуючи наночастинки благородних металів, які є каталізаторами реакції розкладу перекису [4–8].

Найчастіше для створення сенсорів з пористим кремнієм обирають структуру польового транзистора, де пористий шар виконує роль затвору [9] або розташований з тильної сторони підкладки в області затвору [10]. Пористий кремній також використовується як чутливий шар в амперометричних датчиках [3, 4]. У таких структурах виділення електрофізичних процесів, які протікають саме в пористому шарі та на його межі з кремнієм і відповідають за процес детекції аналіту, є ускладненим.

У даній роботі з метою вивчення процесу зміни провідності структури під дією перекису водню були проведені дослідження найпростіших

резистивних датчиків, чутливою областю яких є пористий шар кремнію з наночастинками срібла.

Виготовлення зразків та методика досліджень

Для виготовлення зразків були використані пластини КЕФ 4,5 *n*-типу орієнтації (100) товщиною 450 мкм, аналогічні використовуваним при створенні сенсорів з пористим кремнієм на основі польових транзисторів [10].

Пориста структура кремнію, що одночасно є робочою, чутливою областю сенсора, та осадження на ній наночастинок каталізатора (Ag) були виконані методом метал-стимульованого хімічного травлення (metal-assisted chemical etching — MACE).

Структури формувалися за тією ж технологією, що і сенсори у [10], у три етапи:

- видалення поверхневого шару у травнику CP4 протягом хвилини;
- осадження наночастинок срібла на поверхню Si з розчину нітрату срібла та плавикової кислоти протягом часу τ_{oc} (5 та 10 с);
- метал-стимульоване хімічне травлення Si в розчині 5М HF + 0,3М H₂O₂ за кімнатної температури протягом часу τ_{tr} (30 та 50 хв).

Під час третього етапу відбувається травлення кремнію під наночастинками у напрямку (100) [11, 12]. Морфологію поверхні пористого шару p⁺-Si, отриману на растровому електронному мікроскопі AURA 100, представлено на **рис. 1**. Серед її особливостей необхідно відзначити розвинений рельєф поверхні та нанокристаліти срібла субмікронного розміру.

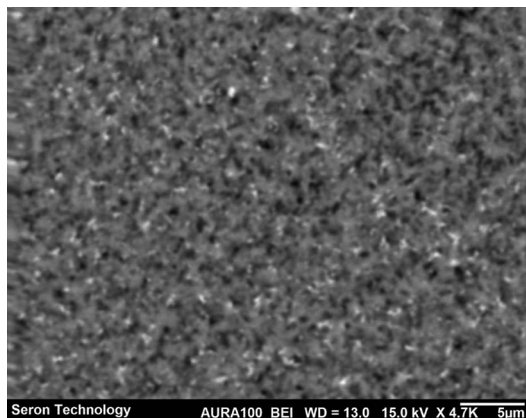


Рис. 1. РЕМ-зображення пористої поверхні з наночастинками срібла

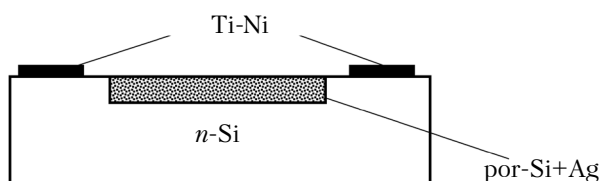


Рис. 2. Схематичне зображення сенсора

Точкові контакти Ti–Ni були нанесені магнетронним напыленням через маску, а після пайки додатково захищені термоклеєм.

Отриману чутливу резистивну структуру схематично представлено на **рис. 2**.

Експеримент проводився за кімнатної температури (14–16°C) в діапазоні концентрацій $C_{H_2O_2} = 1–30\%$. Робоча напруга, залежно від товщини пористого шару, складала 1–10 В, максимальний струм 5 мА. Розчини перекису водню були отримані шляхом розбавлення 3% H_2O_2 виробництва ПАТ «Фітофарм». Краплю розчину перекису водню об'ємом 30 мкл наносили так, щоб він повністю покривав активну область між контактами.

Результати досліджень та їх обговорення

Опір структур складав $R = 0,2–5,0$ кОм, залежно від глибини пористого шару. Для аналізу результатів отримані дані нормувалися на $R_{30\%}$ – величину опору за концентрації 30% H_2O_2 .

Під час реакції каталітичного розкладу H_2O_2 відбувається обмін зарядами між каталізатором та перекисом водню в розчині, що призводить до екстракції електронів із підкладки. Оскільки її роль виконує кремній n -типу провідності, зростання концентрації перекису водню у діапазоні низьких значень ($C_{H_2O_2} = 2–10\%$, залежно від режиму отримання пористого шару) призводить до посилення екстракції електронів у шар $por-Si$, і в результаті відбувається збільшення опору резистивної структури з коефіцієнтом чутливості $\alpha = 0,001–0,02\%/ \%$, який розраховується як

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_2 (C_{2H_2O_2} - C_{1H_2O_2})} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $\Delta R = R_1 - R_2$;

R_1, R_2 – опір сенсора за значень концентрації перекису водню $C_{1H_2O_2}$ та $C_{2H_2O_2}$ відповідно.

За малих значень $C_{H_2O_2}$ коефіцієнт чутливості структур з більш глибокими порами (час травлення пористого шару $\tau_{тр} = 50$ хв) нижчий, ніж структур з мілкими порами, проте нахил графіка залежності ΔR від концентрації перекису зберігається до $C_{H_2O_2} = 10\%$ (**рис. 3**), а для деяких зразків до $C_{H_2O_2} = 15\%$. Подальше падіння опору пов'язане, на нашу думку, з домінуванням

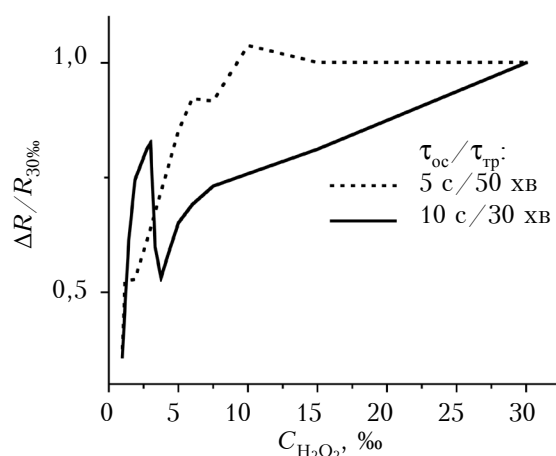


Рис. 3. Залежність від концентрації розчину H_2O_2 відносної зміни опору структур, отриманих методом МАСЕ за різних умов ($\tau_{оч}/\tau_{тр}$)

Залежність збільшення температури зразків в результаті реакції розкладу H_2O_2 від концентрації розчину (теплоємність кремнію 712 Дж/(кг·К), маса 0,05 г)

| $C_{H_2O_2}, \%$ | $Q, Дж$ | $\Delta T, ^\circ C$ |
|------------------|---------|----------------------|
| 1,0 | 0,013 | 0,34 |
| 1,2 | 0,015 | 0,41 |
| 1,4 | 0,018 | 0,47 |
| 1,9 | 0,024 | 0,64 |
| 2,7 | 0,034 | 0,91 |
| 3,0 | 0,038 | 1,01 |
| 3,3 | 0,042 | 1,12 |
| 3,8 | 0,048 | 1,29 |
| 4,3 | 0,054 | 1,45 |
| 5,0 | 0,063 | 1,69 |
| 6,0 | 0,076 | 2,03 |
| 7,5 | 0,095 | 2,54 |
| 10,0 | 0,127 | 3,38 |
| 15,0 | 0,190 | 5,07 |
| 30,0 | 0,380 | 10,15 |

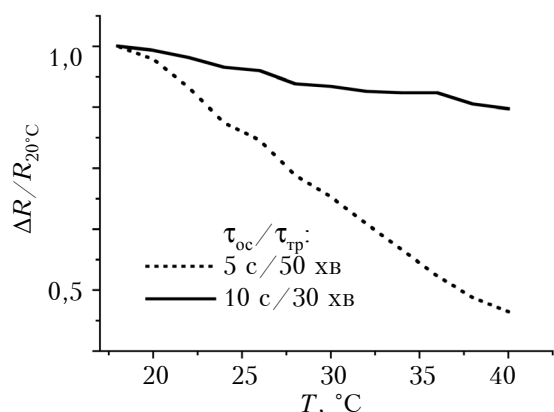


Рис. 4. Температурна залежність опору структур, отриманих методом МАСЕ за різних умов (τ_{oc}/τ_{tr})

процесу зменшення опору в результаті підвищення температури поверхневого шару структури, яке відбувається внаслідок виділення тепла (99 кДж/моль [12]) під час реакції розкладу перекису водню. Оскільки зразки мають невеликі розміри ($8,7 \times 5,7 \times 0,45$ мм = 22 мм³) відносно об'єму краплі розчину (30 мм³), збільшення температури ΔT може бути істотним: як видно з таблиці, величина ΔT сягає 10°C за концентрації $C_{H_2O_2} = 30\%$. Вказаним ефектом розігріву зазвичай нехтують, оскільки вимірювання проводиться для наднизьких (менше 1‰) концентрацій перекису [2, 3, 7].

Досліджувані структури мають від'ємний температурний коефіцієнт опору (0,5–0,8%/K) (рис. 4), тому з ростом концентрації перекису збільшення температури призводить до помітного зменшення опору та появи максимуму на графіку залежності опору від концентрації (див. рис. 3). Положення цього максимуму залежить від товщини пористого шару та концентрації наночастинок срібла. З подальшим ростом концентрації перекису водню екстракція електронів з кристалічного кремнію посилюється, але, вочевидь, не настільки, щоб переважити зменшення опору від розігріву, тому коефіцієнт чутливості спадає до значень 0,0001–0,0003%/‰.

Для підтвердження припущення впливу тепла, виділеного при розкладі перекису водню, на провідність сенсора було проведено корегування залежностей зміни опору від концентрації розчину з урахуванням ефекту зменшення опору під впливом підвищеної температури (рис. 5). Отримані у такому випадку значення коефіцієнта чутливості (0,001–0,01%/‰) виявилися приблизно такими ж самими, як і за низьких концентрацій $C_{H_2O_2}$ без корегування, що підтверджує зроблене припущення. Більш

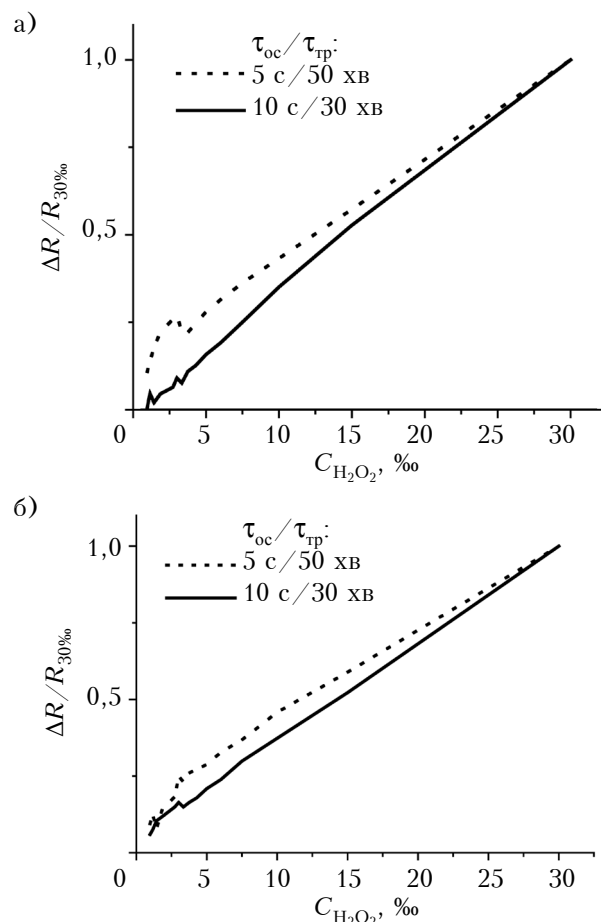


Рис. 5. Залежності від концентрації розчину H_2O_2 відносної зміни опору структур, отриманих методом МАСЕ за різних умов (τ_{oc}/τ_{tr}), розраховані з урахуванням ефекту температурного зменшення опору для різної глибини прогрівання пластини:

a — 450 мкм; б — 150 мкм

точні результати були отримані у випадку, коли вважалося, що кремнієва пластина прогривається не на всю глибину (450 мкм), а лише на третину (рис. 5, б).

Висновки

В результаті дослідження провідності резистивних структур «пористий кремній з наночастинами срібла — кремній» було показано, що під час взаємодії з перекисом водню в них паралельно відбуваються два процеси: зростання опору за рахунок екстракції електронів в пористий шар та температурне зменшення опору в результаті виділення тепла при розкладі перекису водню, що призводить до зменшення чутливості структур з 0,001–0,02 до 0,0001–0,0003%/‰ та появи максимумів на графіку залежності опору від концентрації перекису водню.

Отримані результати змушують переглянути зроблені раніше припущення щодо природи на-

сичення струму витоку у польових транзисторах з пористим кремнієм при зростанні концентрації перекису водню: у [9] вважалося, що таке насичення зумовлене перенасиченням чутливої області продуктами реакції, проте результати даного дослідження вказують на те, що цей процес може бути зумовлений локальним розігрівом підкладки в результаті реакції розкладу перекису водню і потребує більш ґрунтовного дослідження.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Chen S., Yuan R., Chai Y. Electrochemical sensing of hydrogen peroxide using metal nanoparticles: A review // Microchim Acta. — 2013. — Vol. 180. — P. 15–32. — <http://doi.org/10.1007/s00604-012-0904-4>
2. Ensafi A. A., Abarghoui M. M., Rezaei B. Electrochemical determination of hydrogen peroxide using copper/porous silicon based non-enzymatic sensor // Sensors and Actuators B: Chemical. — 2014. — Vol. 196. — P. 398–405. — <http://doi.org/10.1016/j.snb.2014.02.028>
3. Al-Hardan N.H., Abdul Hamid M.A., Shamsudin R. et al. Electrochemical hydrogen peroxide sensor based on macroporous silicon // Sensors. — 2018. — Vol. 18. — P. 716. — <http://doi.org/10.3390/s18030716>
4. Ren C., Song Y., Li Z. Hydrogen peroxide sensor based on horseradish peroxidase immobilized on a silver nanoparticles/cysteamine/gold electrode // Anal Bioanal Chem. — 2005. — Vol. 381. — P. 1179–1185. — <http://doi.org/10.1007/s00216-004-3032-0>
5. Wang Q., Zheng J. Electrodeposition of silver nanoparticles on a zinc oxide film: improvement of amperometric sensing sensitivity and stability for hydrogen peroxide determination // Microchim Acta. — 2010. —

Vol. 169. — P. 361–365. — <http://doi.org/10.1007/s00604-010-0356-7>

6. Wang L., Zhu H., Hou H. A novel hydrogen peroxide sensor based on Ag nanoparticles electrodeposited on chitosan-graphene oxide/cysteamine-modified gold electrode // Journal of Solid State Electrochem. — 2012. — Vol. 16. — P. 1693–1700. — <http://doi.org/10.1007/s10008-011-1576-4>

7. Ensafi A. A., Rezaei B., Rezaei B. Electrochemical sensor based on porous silicon/silver nanocomposite for the determination of hydrogen peroxide // Sensors and Actuators B: Chemical. — 2016. — Vol. 231. — P. 239–244. — <http://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.018>

8. Barillaro G., Diligenti A., Nannini A. et al. Low-concentration NO₂ detection with an adsorption porous silicon FET // IEEE Sensors Journal. — 2006. — Vol. 6. — P. 19–23. — <http://doi.org/10.1109/JSEN.2005.859360>

9. Кутова О., Душейко М., Обухова Т. та ін. Сенсор перекису водню на основі МДН-транзистора з активним шаром в області підкладки // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2017. — Т. 14, № 4. — С. 5–12. — <http://doi.org/10.18524/1815-7459.2017.4.116007>

10. Huang Zh., Zhang X., Reiche M. et al. Extended arrays of vertically aligned sub-10 nm diameter [100] Si nanowires by metal-assisted chemical etching // Nano Letters. — 2008. — Vol. 8, № 9. — P. 3045–3051. — <http://doi.org/10.1021/nl802324y>

11. Huang Zh., Geyer N., Werner P. et al. Metal-assisted chemical etching of silicon: A review // Advanced Materials. — 2011. — Vol. 23. — P. 285–308. — <http://doi.org/10.1002/adma.201001784>

12. Walter C. Schumb hydrogen peroxide. — Reinhold Publishing Corporation, 1955.

Дата надходження рукопису
в редакцію 16.05 2018 р.

О. Ю. КУТОВА, М. Г. ДУШЕЙКО, Б. А. ЛОБОДА, Т. Ю. ОБУХОВА

Украина, Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
E-mail: t.y.obukhova@gmail.com

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ СТРУКТУР «ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА — КРЕМНИЙ» ПРИ ДЕТЕКТИРОВАНИИ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА

Исследовано влияние концентрации перекиси водорода на проводимость системы «пористый кремний с наночастицами серебра — кремний». Пористый слой был образован двухстадийным химическим травлением в присутствии металлов с наночастицами Ag. С целью изучения процессов, происходящих в пористом слое при детектировании перекиси водорода, был использован простой резистивный сенсор, в котором наночастицы серебра выполняли роль катализатора.

Было показано, что при взаимодействии структур с перекисью водорода одновременно происходят два противодействующих процесса: экстракция носителей в пористый кремний и нагрев, вызванный распадом пероксида водорода в присутствии наночастиц Ag, который в некоторых случаях может достигать 10°C. Эти процессы приводят к появлению максимума или насыщения на графике зависимости сопротивления сенсора от концентрации пероксида водорода в диапазоне 10–11 %, при этом чувствительность уменьшается с 0,00–0,02 до 0,0001–0,0003 %/‰.

Ключевые слова: сенсор, перекись водорода, пористый кремний, наночастицы серебра.

CHANGING THE CONDUCTIVITY OF POROUS SILICON
WITH SILVER NANOPARTICLES / SILICON STRUCTURES
WHEN DETECTING HYDROGEN PEROXIDE

The authors investigate the influence of hydrogen peroxide concentration on the conductivity of the porous silicon with silver nanoparticles / crystalline silicon system. A simple resistive sensor with Ag nanoparticles was used as a catalyst in order to study processes occurring in porous silicon during hydrogen peroxide detection. Porous silicon was formed using a two-stage metal-assisted chemical etching with Ag nanoparticles. It was shown that two simultaneous processes are involved here: carrier extraction to porous silicon caused by interaction with hydrogen peroxide molecules and heating caused by hydrogen peroxide decomposition in presence of Ag nanoparticles. Dimensions of the investigated sensor structure were comparable with a drop of the solution, thus at 30‰ concentration heating could reach 10°C. As porous silicon/crystalline silicon system has a negative temperature coefficient, two above mentioned processes counteract which leads to a maximum, or saturation, on the graph of the dependence of resistivity on hydrogen peroxide concentration at 10–11‰. Sensitivity declines from 0.001–0.02 to 0.0001–0.0003%/‰. To prove these thesis resistivity-concentration dependences were adjusted taking into account calculated heating caused by hydrogen peroxide decomposition. It was shown that in this case the slope of the dependence curve remains stable up to 30 ‰ and sensitivity remains about 0.001–0.02%/‰.

Keywords: sensor, hydrogen peroxide, porous silicon, silver nanoparticles.

REFERENCES

1. Chen S., Yuan R., Chai Y. Electrochemical sensing of hydrogen peroxide using metal nanoparticles: a review. *Microchim Acta*, 2013, vol. 180, pp. 15-32. <http://doi.org/10.1007/s00604-012-0904-4>
2. Ensafi A. A., Abarghoui M. M., Rezaei B. Electrochemical determination of hydrogen peroxide using copper/porous silicon based non-enzymatic sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, vol. 196, pp. 398-405. <http://doi.org/10.1016/j.snb.2014.02.028>
3. Al-Hardan N.H., Abdul Hamid M.A., Shamsudin R., AL-Khalqi E.M., Kar Keng L., Ahmed N.M. Electrochemical hydrogen peroxide sensor based on macroporous silicon. *Sensors*, 2018, vol. 18, pp. 716. <http://doi.org/10.3390/s18030716>
4. Ren C., Song Y., Li Z. Hydrogen peroxide sensor based on horseradish peroxidase immobilized on a silver nanoparticles/cysteamine/gold electrode. *Anal Bioanal Chem*, 2005, vol. 381, pp. 1179-1185. <http://doi.org/10.1007/s00216-004-3032-0>
5. Wang Q., Zheng J. Electrodeposition of silver nanoparticles on a zinc oxide film: improvement of amperometric sensing sensitivity and stability for hydrogen peroxide determination. *Microchim Acta*, 2010, vol. 169, pp. 361-365. <http://doi.org/10.1007/s00604-010-0356-7>
6. Wang L., Zhu H., Hou H. A novel hydrogen peroxide sensor based on Ag nanoparticles electrodeposited on chitosan-graphene oxide/cysteamine-modified gold electrode. *Journal of Solid State Electrochem*, 2012, vol. 16, pp. 1693-1700. <http://doi.org/10.1007/s10008-011-1576-4>
7. Ensafi A. A., Rezaei B., Rezaei B. Electrochemical sensor based on porous silicon/silver nanocomposite for the determination of hydrogen peroxide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, vol. 231, pp. 239-244. <http://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.018>
8. Barillaro G., Diligenti A., Nannini A., Strambini L. M., Comini E., Sberveglieri G. Low-concentration NO₂ detection with an adsorption porous silicon FET. *IEEE Sensors Journal*, 2006, vol. 6, pp. 19-23. <http://doi.org/10.1109/JSEN.2005.859360>
9. Kutova O., Dusheiko M., Obukhova T., Maksimchuk N., Borodinova T., Tymofeev V. H₂O₂ sensor based on MOSFET with active back-gate part of substrate. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2017, vol. 14 iss. 4, pp. 5-12. <http://doi.org/10.18524/1815-7459.2017.4.116007>
10. Huang Zh., Zhang X., Reiche M., Liu L., Lee W., Shimizu T., Senz S., Gusele U. Extended arrays of vertically aligned sub-10 nm diameter [100] Si nanowires by metal-assisted chemical etching. *Nano Letters*, 2008, vol. 8, no. 9, pp. 3045-3051. <http://doi.org/10.1021/nl802324y>
11. Huang Zh., Geyer N., Werner P., de Boer J., Gusele U. Metal-assisted chemical etching of silicon: A review. *Advanced Materials*, 2011, vol. 23, pp. 285-308. <http://doi.org/10.1002/adma.201001784>
12. Walter C. *Schumb Hydrogen Peroxide*. Reinhold Publishing Corporation, 1955, 759 p.

Описание статьи для цитирования: Кутова О. Ю., Душейко М. Г., Лобода Б. О., Обухова Т. Ю. Зміна провідності структур «пористий кремній з наночастинками срібла – кремній» при детектуванні перекису водню. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2018, № 4, с. 28-32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.28>

Cite the article as: Kutova O. Yu., Dusheyko M. G., Loboda B. O., Obukhova T. Yu. Changing the conductivity of porous silicon with silver nanoparticles / silicon structures when detecting hydrogen peroxide. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 4, pp. 28-32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.28>

Д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ, д. т. н. А. З. РАХМАТОВ, к. ф.-м. н. О. А. АБДУЛХАЕВ,
к. т. н. У. Х. АРИПОВА, А. Ю. ХИДИРНАЗАРОВА, Ш. М. КУЛИЕВ

Узбекистан, г. Ташкент, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз

E-mail: karimov@uzsci.net

УПРАВЛЕНИЕ ПАДЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ КРЕМНИЕВОГО ДИОДА ПУТЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Приведены результаты исследования вольт-амперных и емкостных характеристик кремниевой диодной $p^+-p-n-p^+$ -структуры, облученной флюенсами быстрых электронов, до и после термической обработки. Показано, что после термической обработки уменьшаются как прямое падение напряжения, так и ток утечки, создавая условия для увеличения выдерживаемой импульсной мощности.

Ключевые слова: диффузионный диод, вольт-амперная характеристика, емкостная характеристика, радиационное облучение, термическая обработка, падение напряжения.

Высокочастотные выпрямительно-ограничительные диоды используются в источниках питания для выпрямления переменного тока, в элементах защиты радиоэлектронного оборудования, а также в переключающих устройствах [1]. Они составляют основу устройств энергосберегающих технологий, отвечая высоким требованиям по выдерживаемой мощности и стабильности параметров. В зависимости от значения допустимого прямого тока выпрямительные диоды подразделяются на диоды малой (прямой ток до 1,0 А) и средней (до 10 А) мощности и мощные (более 10 А). Каждый тип полупроводникового прибора характеризуется рядом эксплуатационных характеристик, которые зависят от электрофизических параметров и совершенства используемых технологических процессов.

Основной задачей в технологическом процессе изготовления высокочастотных диодов является обеспечение оптимального значения прямого падения напряжения, сравнимого с контактной разностью потенциалов $p-n$ -перехода, и малого тока утечки. Также необходимо добиться как можно меньших значений времени восстановления обратного тока и времени жизни неосновных носителей заряда, и для этого диодные структуры подвергаются радиационному воздействию (гамма, электронному, нейтронному или протонному [2–4]). Так, в [5] впервые было показано, что при обработке кремниевых n^+-p^+ -структур ускоренными протонами (500 кэВ , $(3-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) имеет место снижение прямого падения напряжения за счет формирования на границе n^+-p^+ -областей локаль-

ной области толщиной 1 мкм. Кроме того, в [6] было показано, что путем нейтронного облучения можно идентифицировать пробивное напряжение диодных структур, а также уменьшить время жизни неосновных носителей [7, 8].

В [9] на основе исследования зависимости прямого падения напряжения $U_{пр}$ диодов 2Д237 и 2Д2992 от интегрального потока «быстрых» электронов показано, что при облучении дозой до 10^{16} см^{-2} величина $U_{пр}$ растет за счет компенсации легирующей примеси радиационными дефектами с энергетическими уровнями $E_C-0,19 \text{ эВ}$, $E_C-0,21 \text{ эВ}$ (А-центры), а при повышении дозы до $(2-8) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ $U_{пр}$ уменьшается за счет отжига центров $E_C-0,38 \text{ эВ}$, $E_C-0,42 \text{ эВ}$ (дивакансии). Соответственно, если проводится облучение малыми дозами, то для снижения падения напряжения до номинальных значений необходимо провести термический отжиг, что на данный момент мало изучено.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния радиационного воздействия и последующей термической обработки на вольт-амперные и емкостные характеристики высокочастотных диодов.

Образцы для исследований

Исследовались высокочастотные кремниевые диффузионные диоды с $p^+-p-n-p^+$ -структурой, изготовленные на основе кремния КЭФ-4 n -типа проводимости (рис. 1). В исходной пластине кремния толщиной 235 мкм путем последовательной диффузии алюминия на глубину 100 мкм и бора на 45 мкм были получены области p - и p^+ -типа, а диффузией фос-

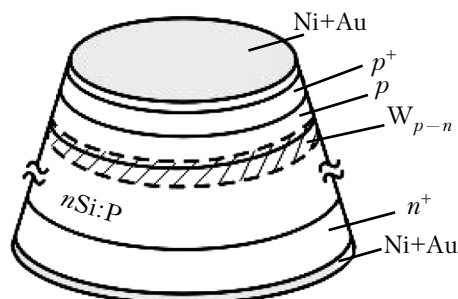


Рис. 1. Геометрическая модель высокочастотного диффузионного диода

фора на тыльную поверхность — сильнолегированная область n^+ -типа. При этом толщина базовой области n -типа составляла 75–80 мкм [8].

Омические контакты получены последовательным нанесением тонких слоев никеля и золота.

Радиационную обработку диодных структур проводили на линейном ускорителе электронов ЭЛУ-6 при величине интегрального потока «быстрых» электронов от $1,0 \cdot 10^{15}$ до $2,6 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$ с энергией 1,5 МэВ, плотность потока электронов составляла $1,7 \cdot 10^{11}$ — $5,5 \cdot 10^{13}$ см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исходная вольт-амперная характеристика (ВАХ) исследуемого высокочастотного кремниевый диода с $p^+ - p - n - n^+$ -структурой описывается экспоненциальной зависимостью с коротким пологим участком, связанным с влиянием сопротивления базы, который после облучения образца становится более протяженным из-за зависимости сопротивления базы от величины тока (рис. 2).

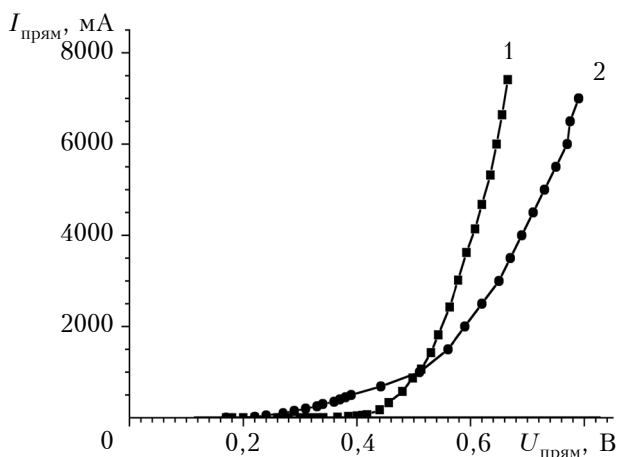


Рис. 2. ВАХ кремниевой диодной $p^+ - p - n - n^+$ -структуры до (1) и после (2) облучения электронами

Зависимость тока от напряжения с учетом падения напряжения на базе описывается уравнением

$$I = I_0 \exp \frac{q(U - I r_0)}{mkT}, \quad (1)$$

где I_0 — ток насыщения;

q — заряд;

U — приложенное напряжение;

$I \cdot r_0$ — падение напряжения в базе (произведение тока на сопротивление базы);

m — коэффициент неидеальности ($m = 1,08$, что соответствует преобладанию диффузионного механизма токопереноса [10]);

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

На рис. 3 приведены прямая и обратная ВАХ облученного кремниевый диода до и после термической обработки галогенной лампой при 90°C в течение 5 часов в специальной камере. Как видно из рис. 3, а, термообработка приводит к смещению прямой ВАХ в область меньших напряжений (т. е. заданный ток можно достичь при меньшем напряжении). При этом, однако, следует отметить, что в области малых значе-

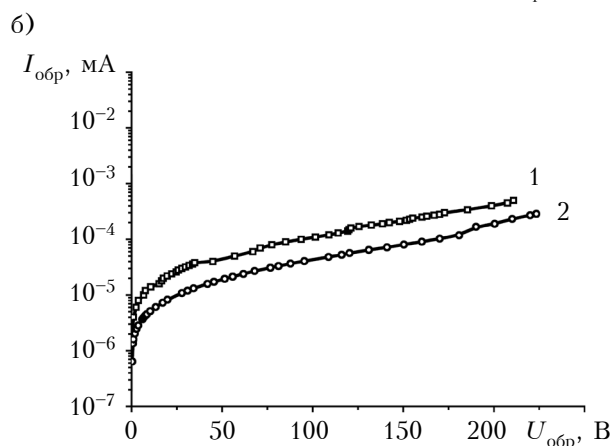
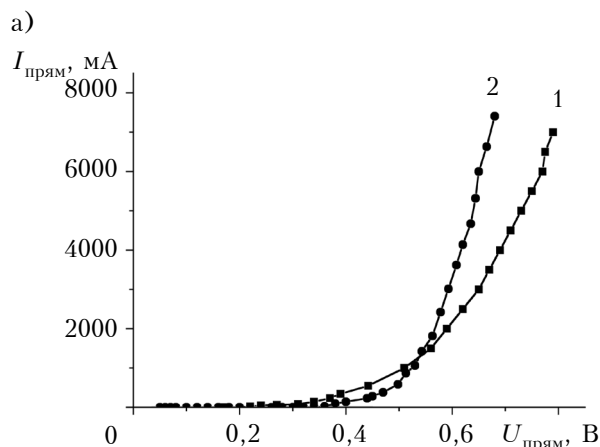


Рис. 3. Прямая (а) и обратная (б) ВАХ кремниевой диодной $p^+ - p - n - n^+$ -структуры до (1) и после (2) термической обработки

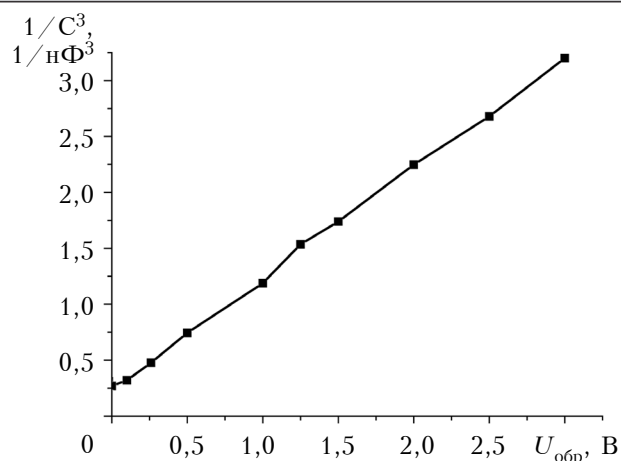


Рис. 4. Зависимость емкости C от запирающего напряжения кремниевой диодной $p^+-p-n-n^+$ -структуры после облучения

ний тока падение напряжения после термобработки может увеличиться, например, с 0,38 до 0,48 В. Ток обратной ветви ВАХ после термической обработки уменьшился примерно в пять раз (рис. 3, б).

Исследования зависимости емкости от напряжения (рис. 4) показали, что в координатах $1/C^3 - U$ она является прямой линией, подтверждая тем самым плавный переход, обусловленный линейным нарастанием концентрации примеси [10]:

$$C_{\text{бар}} = S \sqrt[3]{\frac{q \epsilon \epsilon_0 N}{2(\phi_{\text{кон}} - U)}},$$

где $C_{\text{бар}}$ — барьерная емкость;

S — площадь структуры;

ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника;

ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;

N — концентрация примеси в базовой области;

$\phi_{\text{кон}}$ — контактная разность потенциалов на $p-n$ -переходе;

U — запирающее напряжение.

Здесь следует отметить, что, несмотря на плавность $p-n$ -перехода исследуемых диодных структур, после соответствующей радиационной обработки их исходная емкость уменьшается, поэтому снижается напряженность электрического поля и время включения диодной структуры [8].

Заключение

Экспериментальные исследования показали, что в кремниевой диодной $p^+-p-n-n^+$ -структуре после облучения быстрыми электронами и соответствующей термической обработки прямое падение напряжения уменьшается, приближаясь к первоначальным значениям, а обратный ток уменьшается примерно в пять раз,

что приводит к уменьшению выделяемой диодом мощности. При этом также улучшаются и временные характеристики высокочастотного диода за счет снижения емкости (до одного порядка). Механизм токопереноса до и после обработки остается диффузионным, а линейное распределение примеси в базовой области способствует снижению искажений сигнала при изменении частоты полезного сигнала.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Сеница А. В., Глухов А. В., Скорняков С. П. и др. Некоторые особенности конструирования мощных выпрямительно-ограничительных диодов для сетевых защитных устройств // Силовая электроника. — 2015. — № 4. — С. 54–56.
2. Hazdra P., Vobecky J., Dorschner H., Brand K. Axial lifetime control in silicon power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high-energy electrons // Microelectronics Journal. — 2004. — Vol. 35, № 3. P. 249–257. — [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(03\)00194-0](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(03)00194-0)
3. Козлов В. А., Козловский В. В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α -частицами // Физика и техника полупроводников. — 2001. — Т. 35, № 7. — С. 769–795.
4. Vobecky J., Hazdra P., Zahlava V. Impact of the electron, proton and helium irradiation on the forward $I-V$ characteristics of high-power $p-i-n$ diode // Microelectronics Reliability. — 2003. — Vol. 43, N 4. — P. 537–544. — [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(03\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(03)00023-4)
5. Лагов П. Б., Дренин А. С. Разработка радиационной технологии прецизионного управления характеристиками переключения кремниевых силовых приборов // Сб. трудов Междунар. науч.-технич. Конф. им. Леонардо да Винчи. — Wissenschaftliche Welt, 2013. — Том 1. — С. 130–132.
6. Rakhmatov A. Z., Petrov D. A., Karimov A. V., Yodgorova D. M., Abdulkhaev O. A. Influence of neutron radiation on breakdown voltage of silicon voltage limiter // Radioelectronics and Communication Systems. — 2012. — Vol. 55, iss. 7. — P. 332–334. — <https://doi.org/10.3103/S0735272712070060>
7. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Tarasik M. I., Shpakovski S. V., Filipenia V. A., Skuratov V. A., Wieck A., Koltunowicz T. N. Effects of fluences of irradiation with 10^7 MeV krypton ions on the recovery charge of silicon p^+-n -diodes // Acta Physica Polonica A. — 2011. — Vol. 120, № 1. — P. 111–114. — <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.120.111>
8. Рахматов А. З., Каримов А. В., Сандлер Л. С. и др. Влияние гамма- и электронного облучения на ключевые параметры мощных высокочастотных диффузионных диодов // Компоненты и технологии. — 2013. — № 10. — С. 140–142.
9. Ладыгин Е. А., Орлова М. Н., Волков Д. Л. Основные типы радиационных центров и их влияние на электрофизические параметры кремниевых диодных структур при обработке быстрыми электронами // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. — 2007. — № 2. — С. 22–27.
10. Sze S. M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. — Hoboken-New Jersey, Wiley-Interscience, 2007. — 477 p.

Дата поступления рукописи
в редакцию 01.08 2018 г.

А. В. КАРИМОВ, А. З. РАХМАТОВ, О. А. АБДУЛХАЄВ,
У. Х. АРИПОВА, А. Ю. ХІДІРНАЗАРОВА, Ш. М. КУЛІЄВ

Узбекистан, м. Ташкент,
Фізико-технічний інститут
НВО «Фізика–Сонце» АН РУз
E-mail: karimov@uzsci.net

УПРАВЛІННЯ ПАДІННЯМ НАПРУГИ КРЕМНІЄВОГО ДІОДА ШЛЯХОМ ОПРОМІНЕННЯ ЕЛЕКТРОНАМИ ТА ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Високочастотні випрямні обмежувальні діоди використовуються в джерелах живлення для випрямлення змінного струму, в елементах захисту радіоелектронного обладнання, а також в перемикаючих пристроях. Вони складають основу пристроїв енергозберігаючих технологій, відповідаючи високим вимогам щодо витримуваної потужності і стабільності параметрів. Основним завданням у технологічному процесі виготовлення високочастотних діодів є забезпечення оптимального значення прямого падіння напруги, яке можна порівняти з контактною різницею потенціалів $p-n$ -переходу, і малого струму витoku.

Дана робота присвячена вивченню впливу радіаційного опромінення та подальшої термічної обробки на вольт-амперні та ємнісні характеристики високочастотних кремнієвих діодів.

Досліджувалися діоди з $p^+-p-n-n^+$ -структурою, виготовлені з пластин кремнію КЕФ-4 n -типу провідності вихідною товщиною 235 мкм. Радіаційну обробку проводили на лінійному прискорювачі електронів ЕЛУ-6. Інтегральний потік «швидких» електронів складав від $1,0 \cdot 10^{15}$ до $2,6 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$, енергія 1,5 МеВ, щільність $1,7 \cdot 10^{11} - 5,5 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$. Термічну обробку проводили протягом 5 годин за температури 90°C у спеціальній камері.

На основі проведених досліджень показано, що термообробка призводить до зміщення прямої вольт-амперної характеристики в область менших напруг (тобто заданий струм можна досягти за меншої напруги), однак за малих значень струму падіння напруги після термообробки може збільшитися. Зворотний струм зменшується в n разів, спричиняючи зменшення виділеної потужності. При цьому також покращуються і часові характеристики діода за рахунок зниження ємності (до одного порядку).

Ключові слова: дифузний діод, вольт-амперна характеристика, ємнісна характеристика, радіаційне опромінення, термічна обробка, падіння напруги.

DOI: 10.15222/TKEA2018.4.33
UDC 621.315.592.2:546.681'19

A. V. KARIMOV, A. Z. RAKHMATOV, O. A. ABDULKHAEV,
U. H. ARIPOVA, A. Yu. KHIDIRNAZAROVA, Sh. M. KULIYEV

Uzbekistan, Tashkent, Physical-Technical Institute,
Scientific Association Physics–Sun,
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
E-mail: karimov@uzsci.net

CONTROLLING VOLTAGE DROPS IN SILICON DIODES BY ELECTRON IRRADIATION AND THERMAL TREATMENT

High-frequency limiting rectifier diodes are used in power sources for rectifying alternating current, in protective elements of radio-electronic equipment, and in switching devices. They are the basis of energy-saving devices, meeting the high requirements for power limit and performance. The main task in the manufacturing process of high-frequency diodes is to ensure the low leakage current and the optimum value of the forward voltage drop which can be compared with the contact potential difference of the $p-n$ junction.

This paper is devoted to studying the effect of radiation exposure and subsequent heat treatment on the current-voltage and capacitance characteristics of high-frequency silicon diodes. The authors studied $p^+-p-n-n^+$ diodes made of n -type KEF-4 (КЭФ-4) silicon wafers with an initial thickness of 235 μ m. Radiation processing was performed using an ELU-6 (ЭЛУ-6) linear electron accelerator. The integral flux of "fast" electrons ranged from $1,0 \cdot 10^{15}$ to $2,6 \cdot 10^{17}$ cm $^{-2}$, energy was 1.5 MeV, density was $1,7 \cdot 10^{11} - 5,5 \cdot 10^{13}$ cm $^{-2}$ ·s $^{-1}$. Heat treatment was performed for 5 hours at a temperature of 90°C in a special chamber.

The studies have shown that heat treatment lead to a shift of the forward current-voltage characteristic to a region of lower voltages (i.e., a given current can be reached at a lower voltage); at low current values, however, the voltage drop may increase after heat treatment. Reverse current decreased fivefold, resulting in a decrease in power output. At the same time, the temporal characteristics of the diode could also be improved by reducing the capacitance (to one order of magnitude).

Keywords: diffuse diode, current-voltage characteristic, capacitance characteristic, radiation exposure, heat treatment, voltage drop.

REFERENCES

1. Sinitsa A.V., Glukhov A.V., Skorniyakov S.P., Karimov A.V., Rakhmatov A.Z. [Some features of designing powerful rectifier-limiting diodes for network protection devices]. *Power electronics*, 2015, no. 3, pp. 54–56. (Rus)
2. Hazdra P., Vobecky J., Dorschner H., Brand K. Axial lifetime control in silicon power diodes by irradiation with protons, alphas, low- and high-energy electrons. *Microelectronics Journal*, 2004, vol. 35, no. 3, pp. 249–257. [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(03\)00194-0](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(03)00194-0)
3. Kozlov V. A., Kozlovski V. V. Doping of semiconductors using radiation defects produced by irradiation with protons and alpha particles. *Semiconductors*, 2001, vol. 35, iss. 7, pp. 735–761. <https://doi.org/10.1134/1.1385708>.
4. Vobecky J., Hazdra P., Zahlava V. Impact of the electron, proton and helium irradiation on the forward I–V characteristics of high-power P–i–N diode. *Microelectronics Reliability*, 2003, vol. 43, no. 4, pp. 537–544. [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(03\)00023-4](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(03)00023-4)
5. Lagov P.B., Drenin A.S. Development of radiation technology for precision control of switching characteristics of silicon power devices. *Proceedings of the International Scientific and Technical Leonardo da Vinci Conference*. Wissenschaftliche Welt, 2013, vol. 1, pp. 130–132. (Rus)
6. Rakhmatov A. Z., Petrov D.A., Karimov A.V. et al. Influence of neutron radiation on breakdown voltage of silicon voltage limiter. *Radioelectronics and Communication Systems*, 2012, vol. 55, iss. 7, pp. 332–334. <https://doi.org/10.3103/S0735272712070060>
7. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Tarasik M. I. et al. Effects of fluences of irradiation with 10^7 MeV krypton ions on the recovery charge of silicon p⁺–n–diodes. *Acta Physica Polonica A*, 2011, vol. 120, no. 1, pp. 111–114. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.120.111>
8. Rakhmatov A.Z., Karimov A.V., Sandler L.S., Yodgorova D.M., Skorniyakov S.P. [Influence of gamma and electron irradiation on the key parameters of high-power high-frequency diffusion diodes]. *Components and technologies*, St. Petersburg, 2013, no. 10, pp. 140–142. (Rus)
9. Ladygin E.A., Orlova M.N., Volkov D.L. [The main types of radiation centers and their influence on the electro-physical parameters of silicon diode structures during processing by fast electrons]. *Journal Materials of Electronics*, 2007, no. 2, pp. 22–27. (Rus)
10. Sze S.M., Kwok K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Hoboken-New Jersey, Wiley-Interscience, 2007, 477 p.

Описание статьи для цитирования:

Каримов А. В., Рахматов А. З., Абдулхаев О. А., Арипова У. Х., Хидирназарова А. Ю., Кулиев Ш. М. Управление падением напряжения кремниевого диода путем облучения электронами и термической обработки. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 4, с. 33–37. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.33>

Cite the article as:

Karimov A. V., Rakhmatov A. Z., Abdulkhaev O. A., Aripova U. H., Khidirnazarova A. Yu., Kuliyeu Sh. M. Controlling voltage drops in silicon diodes by electron irradiation and thermal treatment. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2018, no. 4, pp. 33–37. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.33>

НОВИ КНИГИ

НОВИ КНИГИ

Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 3. Методы повышения надежности.— Одесса: Политехперіодика, 2018.

Книга посвящена одной из ключевых проблем проектирования термоэлектрических устройств (ТЭУ) — поиску путей повышения их надежности. Исследованы основные методы повышения показателей надежности ТЭУ: конструктивный, параметрический, структурный и комбинированный. Приведены результаты расчетов основных характеристик и показателей надежности одно- и двухкаскадных ТЭУ в зависимости от геометрии ветвей термоэлементов, токового режима работы, параметров исходных материалов термоэлементов (термоэлектрической эффективности, коэффициента термо-эдс и электропроводности) и проведен анализ полученных результатов. Также рассмотрены простейшие схемы резервирования элементов и проведен сравнительный анализ различных способов включения резерва. Показаны возможности комбинированного (совмещенного) метода повышения показателей надежности ТЭУ путем оценки совместного использования конструктивного и параметрического методов в сравнении с результатами, которые можно получить при их раздельном применении.

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



Д. т. н. О. В. ТИМЧЕНКО¹, к. т. н. В. І. ЛОЗИНСЬКИЙ²Україна, м. Львів, ¹Українська академія друкарства,
²Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: o_tymch@ukr.net; zolysav@gmail.com

МЕТОД АДАПТИВНОЇ ДЕЛЬТА-МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ
ДОВІЛЬНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ АДАПТАЦІЇ У СЕНСОРНІЙ
МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ЕКГ

Використання різницевих методів для подання інформації у безпроводних сенсорних мережах може призвести до суттєвого зниження енергоспоживання, але застосування адаптивної дельта-модуляції (АДМ) призводить до спотворень оброблюваних сигналів. На базі методу АДМ Меньшикова розроблено метод АДМ для довільних коефіцієнтів адаптації, який забезпечує мінімальну абсолютну похибку на n -му інтервалі дискретизації. Наведено результати комп'ютерного моделювання та здійснено порівняльний аналіз різницевих сигналів під час подання електрокардіограми за допомогою методів АДМ з миттєвою адаптацією, з підвищеною інформативністю Уінклера, Меньшикова та розробленого методу АДМ для довільних коефіцієнтів адаптації.

Ключові слова: адаптивна дельта-модуляція, довільні коефіцієнти адаптації, ЕКГ, сенсорні мережі, моделювання.

Перетворення аналогових сигналів в цифрову форму в загальному випадку здійснюється за допомогою процесів дискретизації та квантування. Квантуванню можуть піддаватися як безпосередньо відліки сигналу (імпульсно-кодова модуляція, **ІКМ**), так і різниці між відліками сигналу (диференціально-кодова модуляція [1]). Остання має ряд переваг над кодуванням відліків, зокрема значно меншу розрядність кодування. Граничним її випадком є однорозрядне кодування, що має назву дельта-модуляції (**ДМ**). Постійний крок квантування під час ДМ вимагає дуже високої частоти дискретизації аналогового сигналу [2], тому для її зменшення застосовують адаптивну зміну кроку залежно від миттєвої крутості [3] (похідної) сигналу, що перетворюється в код.

Використання різницевих методів для подання інформації у безпроводних сенсорних мережах може призвести до суттєвого зниження їх енергоспоживання, що спричинюється зменшенням обсягу даних, які подаються на радіопередавачі [4]. У [5] показано результати комп'ютерного моделювання та розрахунок коефіцієнту стиснення переданої інформації для випадку кодування електрокардіограми (**ЕКГ**) у безпроводних сенсорних мережах за допомогою однорозрядної адаптивної ДМ (**АДМ**) з миттєвою адаптацією [6]. Однак застосування АДМ до ЕКГ призводить до спотворень останньої, що затруднює встановлення правильного діагнозу пацієнта.

Метою даної роботи є розроблення методу АДМ та визначення параметрів модуляції, які

у застосуванні до сигналу ЕКГ дозволять зменшити обсяг даних для передавання з мінімальним спотворенням відновленого сигналу.

Метод АДМ Меньшикова Г. Г.

Г. Г. Меньшиков теоретично обґрунтував метод АДМ, що дозволяє мінімізувати абсолютну похибку на n -му інтервалі дискретизації [7]. У випадку $n \geq 2$ його можна подати за допомогою наступних виразів:

— для $|s_{n-1}| > s_{\min}$

$$s_n = s_{n-1} \times \begin{cases} 2, & \text{якщо } \xi_n \geq 0,75, \\ -\frac{1}{2}, & \text{якщо } \xi_n \leq 0,75; \end{cases} \quad (1)$$

— для $|s_{n-1}| = s_{\min}$

$$s_n = s_{n-1} \times \begin{cases} 2, & \text{якщо } \xi_n \geq 0,5, \\ -1, & \text{якщо } \xi_n \leq 0,5; \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{де } \xi_n = \frac{x_n - \hat{x}_{n-1}}{s_{n-1}};$$

s_{\min} — мінімальний крок квантування ДМ-кодера;

$\{s_n\}$ — послідовність кроків квантування ДМ-кодера;

$\{x_n\}$ — послідовність відліків сигналу у форматі ІКМ;

$\{\hat{x}_n\}$ — послідовність апроксимуючих відліків сигналу у форматі ІКМ;

$$n = \overline{1, N};$$

N — кількість відліків сигналу в форматі ІКМ.

На практиці зручно прийняти, що

$$\hat{x}_0 = 0, |s_1| = s_{\min}, \quad (3)$$

тоді

$$s_1 = \operatorname{sgn} x_1 \cdot s_{\min}. \quad (4)$$

Слід зазначити, що коефіцієнт адаптації описаного методу $K_{\text{АД}} = 2$, що пов'язано із його зручністю для апаратної реалізації. Однак питання оптимальності такого значення $K_{\text{АД}}$ для зменшення похибки квантування у [7] не розглядалось. Тому виникла потреба розроблення методу АДМ для довільних коефіцієнтів адаптації. Правильний підбір коефіцієнтів адаптації, в свою чергу, може призвести до збільшення точності сигналу, який відтворюється на основі отриманого дельта-коду.

Метод АДМ для довільних коефіцієнтів адаптації

Для розроблення методу введемо коефіцієнти адаптації, які пропонується використовувати для розрахунку кроків квантування ДМ-кодера залежно від поведінки крутості сигналу на аналізованій ділянці: $K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}}$ — коли крутість зростає, $K_{\text{АД}}^{\text{СП}}$ — коли спадає.

Зупинимось на алгоритмі побудови $\{\hat{x}_n\}$, що задовольняє наступній вимозі: значення $\{s_n\}$ мають обчислюватись послідовно для $n = 1, 2, \dots$, причому так, щоб за фіксації $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{n-1}, x_1, \dots, x_n$ абсолютна похибка на n -му кроці $|x_n - \hat{x}_n|$ була мінімальною.

Теорема. Алгоритм наближення, що задовольняє сформульованому критерію, у випадку $n \geq 2$ записується за допомогою наступних співвідношень:

— для $|s_{n-1}| > s_{\min}$

$$s_n = s_{n-1} \times \begin{cases} K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}}, & \text{якщо } \xi_n \geq \frac{K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} - K_{\text{АД}}^{\text{СП}}}{2}, \\ -K_{\text{АД}}^{\text{СП}}, & \text{якщо } \xi_n \leq \frac{K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} - K_{\text{АД}}^{\text{СП}}}{2}; \end{cases} \quad (5)$$

— для $|s_{n-1}| = s_{\min}$

$$s_n = s_{n-1} \times \begin{cases} K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}}, & \text{якщо } \xi_n \geq \frac{K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} - 1}{2}, \\ -1, & \text{якщо } \xi_n \leq \frac{K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} - 1}{2}. \end{cases} \quad (6)$$

За умови наявності у відповідних виразах знаку «=», вибір одного з двох значень s_n є довільним.

Доведення. Для спрощення позначимо $\varepsilon_n = x_n - \hat{x}_{n-1}$ і запишемо $x_n - \hat{x}_n = \varepsilon_n - s_n$. Припустимо, що алгоритм апроксимації задовольняє умові теореми. Очевидно, що внаслідок (3) має виконуватись і (4).

Нехай тепер $n \geq 2$. Припустимо, що $|s_{n-1}| > s_{\min}$. Тоді, якщо

$$|\varepsilon_n - K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} \hat{x}_{n-1}| < |\varepsilon_n + K_{\text{АД}}^{\text{СП}} \hat{x}_{n-1}|, \quad (7)$$

то

$$s_n = s_{n-1} K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}}. \quad (8)$$

Якщо в (7) має місце рівність, то припустимо як (8), так і $s_n = s_{n-1} K_{\text{АД}}^{\text{СП}}$. Однак розв'язком (7) є

$$\xi_n > \frac{K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} - K_{\text{АД}}^{\text{СП}}}{2}. \quad (9)$$

Достатність умов теореми є очевидною: якщо виконується (9), то має місце (7) із знаком « \leq ».

Випадок $|s_{n-1}| = s_{\min}$ розглядається аналогічно.

Результати комп'ютерного моделювання

У роботі порівнювались результати комп'ютерного моделювання у середовищі Matlab, які були отримані за використання чотирьох різних методів АДМ для подання ЕКГ: з миттєвою адаптацією (**А**), з підвищеною інформативністю Уінклера (**У**) [8], Меньшикова (**М**) та запропонований авторами метод АДМ для довільних коефіцієнтів адаптації (**Д**). (Зазначимо, що для спрощення позначень у формулах загального вигляду будемо використовувати індекс « i », замість якого для відповідного метода будемо записувати, відповідно, «**А**», «**У**», «**М**» чи «**Д**».)

На основі доведеної теореми було розроблено алгоритм моделювання методу АДМ для довільних коефіцієнтів адаптації у випадку, коли $K_{\text{АД}}^{\text{СП}} = 1 / K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}}$. Його можна записати наступним чином:

$$s_n = s_{n-1} \times \begin{cases} 1, & \text{якщо } \xi_n \geq \frac{K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} - K_{\text{АД}}^{\text{СП}}}{2}, \\ & |s_{n-1}| = s_{\min} \cdot (K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}})^{C^{\text{Д}}-1}; \\ K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}}, & \text{якщо } \xi_n \geq \frac{K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} - K_{\text{АД}}^{\text{СП}}}{2}, \\ & |s_{n-1}| < s_{\min} \cdot (K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}})^{C^{\text{Д}}-1}; \\ K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}}, & \text{якщо } \xi_n \geq \frac{K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} - 1}{2}, \\ & |s_{n-1}| = s_{\min}; \\ -1, & \text{якщо } \xi_n < \frac{K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} - 1}{2}, \\ & |s_{n-1}| = s_{\min}; \\ -K_{\text{АД}}^{\text{СП}}, & \text{якщо } \xi_n < \frac{K_{\text{АД}}^{\text{ЗР}} - K_{\text{АД}}^{\text{СП}}}{2}, \\ & |s_{n-1}| > s_{\min}, \end{cases} \quad (10)$$

де $C^{\text{Д}}$ — розрядність АДМ-кодера для довільних коефіцієнтів адаптації.

Згадані види АДМ характеризуються інерційністю, яка проявляється у тому, що АДМ-кодер під час опрацювання ізоляції сигналу ЕКГ видає на виході послідовності ненульовий флуктуаційний сигнал. Така інерційність усувалась шляхом накладання у часовій області прямокутного вікна

$$w_n = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x_{n-k}^{\text{ІКМ}} \neq 0, \\ 0, & \text{якщо } x_{n-k}^{\text{ІКМ}} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

на відновлений сигнал АДМ-кодера $\{w_n x_{n-k}^{(i)}\}$ [5], де $\{x_n^{(i)}\}$ — відліки відновленого сигналу відповідного адаптивного дельта-кодера, k — кількість відліків, на яку зсунуто ряд $\{x_n^{\text{ІКМ}}\}$ відносно ряду $\{x_n^{(i)}\}$.

Відхилення відліків відновлених сигналів адаптивних дельта-кодерів $\{x_n^{(i)}\}$ від ідеальних, за які прийнято відліки сигналу ЕКГ у форматі ІКМ $\{x_n^{\text{ІКМ}}\}$ із розрядністю $C^{\text{ІКМ}} = 12$ оціню-

вались за допомогою нормованої середньоквадратичної похибки на основі наступного виразу:

$$\sigma^{(i)} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n^{(i)} - x_n^{\text{ІКМ}})^2}{D_x^{\text{ІКМ}}}}, \quad (12)$$

де $D_x^{\text{ІКМ}}$ — дисперсія сигналу $\{x_n^{\text{ІКМ}}\}$ на виході ІКМ-кодера,

$$D_x^{\text{ІКМ}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n^{\text{ІКМ}} - \bar{x}^{\text{ІКМ}})^2; \quad (13)$$

$\bar{x}^{\text{ІКМ}}$ — середнє значення сигналу $\{x_n^{\text{ІКМ}}\}$,

$$\bar{x}^{\text{ІКМ}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^{\text{ІКМ}}. \quad (14)$$

На **рис. 1** показано відліки сигналу ЕКГ, модельованого у форматі ІКМ, та сигналу АДМ-кодера, відновленого різними методами. Параметри АДМ-кодера з миттєвою адаптацією є наступ-

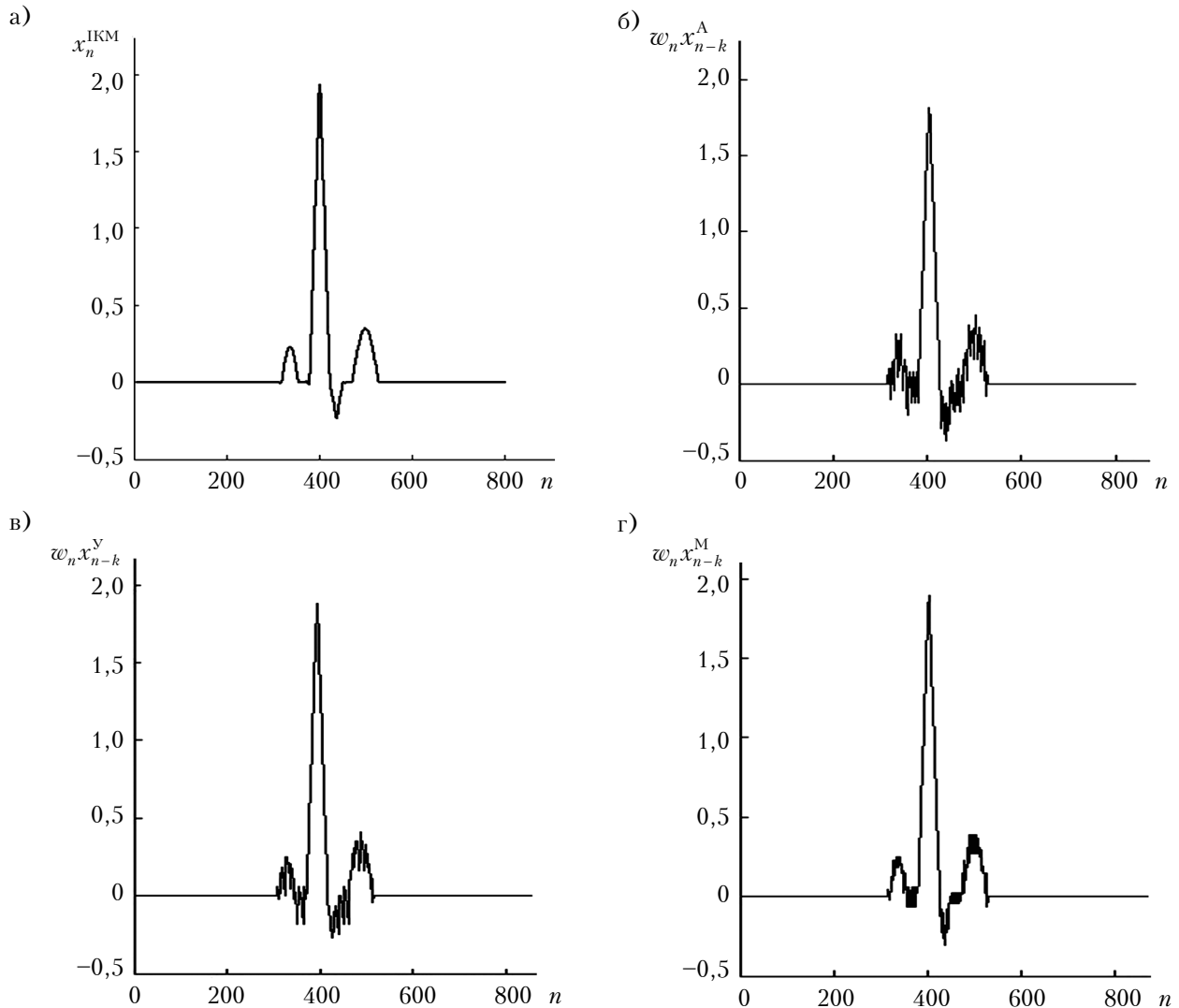


Рис. 1. Відліки сигналу ЕКГ, модельованого у форматі ІКМ (а) та відновленого після АДМ-кодерів з миттєвою адаптацією (б), Уінклера (в), Меньшикова (г)

ними: частота дискретизації $f_D^A = f_D^{IKM} = 8f_B$, де f_B — частота найвищої частотної складової оброблюваного сигналу; розрядність $C^A = 4$; відношення $s_{\min}^A / s^{IKM} = 39$. Як видно з рис. 1, б, у даному випадку спостерігається значне спотворення сигналу ЕКГ, середньоквадратичне відхилення становить $\sigma^A = 19$.

За відновлення сигналу АДМ-кодерами Уінклера та Меньшикова частота дискретизації, розрядність різницевого коду та величина мінімального кроку квантування такі ж самі, як і в попередньому випадку, але значення нормованої середньоквадратичної похибки суттєво менші і становлять, відповідно, $\sigma^Y = 0,14$ та $\sigma^M = 0,10$.

На рис. 2 показано відліки сигналу, відновленого запропонованим авторами методом АДМ з коефіцієнтами адаптації $K_{AD}^{3P} = 4$ та $K_{AD}^{CP} = 0,25$. Тут вдалося ще більше понизити розрядність дельта-кодера ($C^D = 3$) і зменшити до 0,08 величину нормованої середньоквадратичної похибки σ^D . Відношення $s_{\min}^D / s^{IKM} = 41$, а інші вихідні параметри такі ж самі, як і у розглянутих вище випадках.

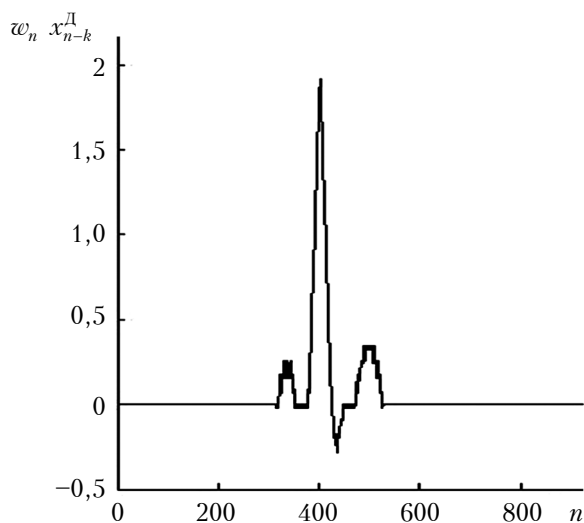


Рис. 2. Відліки сигналу ЕКГ, відновленого методом АДМ для довільних коефіцієнтів адаптації

На рис. 3 показано сімейство згладжених залежностей нормованої середньоквадратичної похибки σ^i відновленого сигналу ЕКГ від співвідношення $s_{\min}^{(i)} / s^{IKM}$ для всіх розглянутих різницевих методів. Як було сказано вище, для А-, У- та М-кодерів розрядність різницевого сигналу становила $C^A = C^Y = C^M = 4$, а для Д-кодера із $K_{AD}^{3P} = 4$ та $K_{AD}^{CP} = 0,25$ розрядність $C^D = 3$, натомість частота дискретизації різницевих сигналів у всіх цих випадках однакова і становить $f_D^A = f_D^Y = f_D^M = f_D^D = 8f_B$. Зростання $\sigma^{(i)}$ із зменшенням співвідношення $s_{\min}^{(i)} / s^{IKM}$ пов'язане із перевантаженням дельта-кодерів за

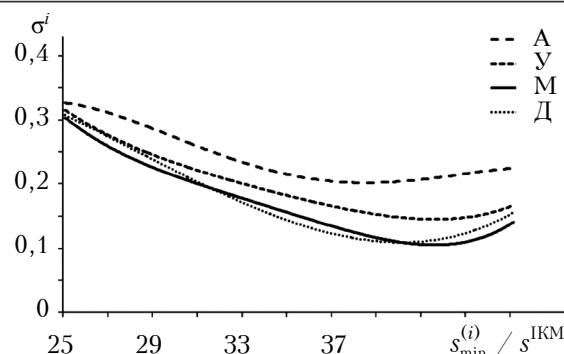


Рис. 3. Залежність нормованої середньоквадратичної похибки $\sigma^{(i)}$ від співвідношення $s_{\min}^{(i)} / s^{IKM}$ для різних методів відновлення сигналу (А, У, М, Д)

крутістю, натомість збільшення $\sigma^{(i)}$ із зростанням $s_{\min}^{(i)} / s^{IKM}$ спричинене зростанням похибки квантування дельта-кодерів.

З даних, наведених на рис. 3, видно, що для заданого сигналу ЕКГ і параметрів А-, У- та М-кодерів за розрядності 4 найбільша середньоквадратична похибка виникає, коли для обробки сигналу застосовується метод з миттєвою адаптацією. Дещо менший рівень похибки забезпечує метод Уінклера, і ще менший — метод Меньшикова.

Відносно добре відновлення сигналу ЕКГ змодельованим Д-кодером за розрядності $C^D = 3$ стало можливим внаслідок того, що наростання/спадання кроків квантування дельта-кодера у даному випадку є значно інтенсивнішим, ніж у всіх інших розглянутих адаптивних методах. Ця особливість дозволяє добре відпрацьовувати круті ділянки ЕКГ за описаних частот дискретизації.

Висновки

Запропонований метод адаптивної дельта-модуляції із можливістю вибору довільних коефіцієнтів адаптації дозволяє підбирати останні із врахуванням форми оброблюваного сигналу. При цьому сигнал перетворюється у різницевий з мінімальною абсолютною похибкою на n -му кроці. Такий підхід призводить до отримання найменшого середньоквадратичного відхилення різницевого сигналу від поданого у форматі імпульсно-кодової модуляції, а в деяких випадках дозволяє знизити розрядність різницевого сигналу без втрат його точності. Підвищення точності відтворення сигналу відіграє значну роль у випадках кодування сигналів електрокардіограми, оскільки це пов'язане з постановкою діагнозу пацієнту. Слід зазначити, що запропонований метод можна застосовувати до аналого-цифрового перетворення будь-яких сигналів, наприклад звукових.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Харатишвили Н.Г. Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция в системах связи. — Москва: Радио и связь, 1982.
2. Стил Р. Принципы дельта-модуляции. — Москва: Связь, 1979.
3. Гуров И. П. Основы теории информации и передачи сигналов. — СПб.: ВHV-Санкт-Петербург, 2000.
4. Росляков А.В., Ваяшин С.В., Гребешков А.Ю. Интернет вещей: учебное пособие. — Самара: ПГУТИ, 2015.
5. Лозинский В., Тимченко О. Підвищення енергоощадності сенсорної мережі мобільного моніторингу ЕКГ за допомогою різницевого методу // Моделювання та інформаційні технології. — Київ: Інститут проблем моделю-

вання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2016. — Вип. 77. — С. 117—123.

6. Тимченко О. В. Методи різницевого кодування форм сигналів в системах передачі мовної інформації. — Львів: Українська академія друкарства, 2006.

7. Меньшиков Г. Г. Дискретно-разностное приближение (дельта-модуляция) по Уинклеру // Проблемы передачи информации. — 1969. — Т. 5, вып. 2. — С. 79—83.

8. Уинклер М. Дельта-модуляция с повышенной информативностью // Зарубежная радиоэлектроника. — 1964. — №5. — С. 25—34.

Дата надходження рукопису
до редакції 03.08 2018 р.

Л. А. В. ТИМЧЕНКО¹, В. И. ЛОЗИНСКИЙ²

Украина, г. Львов, ¹Украинская академия печати,

²Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: o_tymch@ukr.net; zolysav@gmail.com

МЕТОД АДАПТИВНОЙ ДЕЛЬТА-МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ АДАПТАЦИИ В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ МОБИЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ЭКГ

Использование разностных методов для представления информации в беспроводных сенсорных сетях может привести к существенному снижению энергопотребления, однако применение адаптивной дельта-модуляции (АДМ) приводит к искажениям обрабатываемых сигналов. На базе метода АДМ Меньшикова разработан метод АДМ для произвольных коэффициентов адаптации, который обеспечивает минимальную абсолютную погрешность на n -м интервале дискретизации. Приведены результаты компьютерного моделирования и сделан сравнительный анализ разностных сигналов при подаче электрокардиограммы с помощью методов АДМ с мгновенной адаптацией, с повышенной информативностью Уинклера, Меньшикова и разработанного метода АДМ для произвольных коэффициентов адаптации. Показано, что предложенный метод приводит к получению наименьшего среднеквадратичного отклонения разностного сигнала от сигнала, представленного в формате импульсно-кодовой модуляции, а в некоторых случаях позволяет снизить разрядность разностного сигнала без потерь его точности. Предложенный метод можно применять при аналого-цифровом преобразовании любых сигналов, например звуковых.

Ключевые слова: адаптивная дельта-модуляция, произвольные коэффициенты адаптации, ЭКГ, сенсорные сети, моделирование.

DOI: 10.15222/TKEA2018.4.38
UDC 621.3

О. В. ТИМЧЕНКО¹, В. И. ЛОЗИНСКИЙ²

Ukraine, Lviv, ¹Ukrainian Academy of Printing,

²Lviv Polytechnic National University

E-mail: o_tymch@ukr.net; zolysav@gmail.com

ADAPTIVE DELTA MODULATION METHOD FOR ARBITRARY ADAPTATION COEFFICIENTS IN THE SENSOR NETWORK OF THE MOBILE ECG MONITORING

The usage of difference methods for information supply in wireless sensor networks can lead to reduction in their power consumption. However, the usage of adaptive delta modulation (ADM) leads to distortion of processed signals. Therefore, the development of ADM methods and researching their parameters to increase the accuracy of the reconstructed signal from the differential code is an important scientific task. Menshikov G.G. theoretically substantiated the ADM method, which allows minimizing the absolute error in the n^{th} sampling interval. The adaptation coefficient of this method is equal to 2, which is relevant with its convenience for hardware implementation. However, the optimality of its value for reducing the quantization error of the adaptive delta encoder was not considered. Therefore, there was a need to develop an ADM method based

on the Menshikov's ADM for arbitrary adaptation coefficients. The right selection of adaptation coefficients can lead to an increase of signal accuracy which is reproduced based on the received delta code. The article presents a method for arbitrary adaptation coefficients which provides a minimum absolute error on the n -th sampling interval. This approach leads to the smallest RMS error of differential signal from the one in PCM format, and in some cases, it allows reducing the resolution of differential signal without loss of its accuracy. The article also provides the results of computer modeling. A comparative analysis of differential signals during ECG supply helped by ADM with instant adaptation, Winkler's HIDM, the Menshikov's method and the developed method for arbitrary adaptation coefficients has been carried out. The proposed ADM method makes it possible to select the adaptation coefficients taking into account the forms of the processed signal.

Keywords: adaptive delta modulation, arbitrary adaptation coefficients, ECG, sensor networks, modeling.

REFERENCES

1. Kharatishvili N. G. *Differentsial'naya impul'sno-kodovaya modulyatsiya v sistemakh svyazi* [Differential Pulse Code Modulation in Communication Systems]. Moscow, Radio i svyaz', 1982, 136 p. (Rus)
2. Steele R. *Delta Modulation Systems*. London, Pentech Press&Halsted Press, 1975, 379 p.
3. Gurov I.P. *Osnovy teorii informatsii i peredachi signalov* [Fundamentals of information theory and signals transmission]. St. Petersburg, BHV-St. Petersburg, 2000, 97 p. (Rus)
4. Roslyakov A.V., Vanyashin S.V., Grebeshkov A.Yu. *Internet veshchei* [Internet of Things]. Samara, PSUTI, 2015, 200 p. (Rus)]
5. Lozynsky V., Tymchenko O. [Energy-saving immobile ECG monitoring sensor network by differential methods]. *Modeling and Information Technologies*, Kyiv, Pukhov Institute for Energy Modelling of NAS of Ukraine, 2016, iss. 77, pp. 117-123. (Ukr)
6. Tymchenko O. *Metody riznitseвого koduvannya formy sygnaliv v systemakh peredachi mownoyi informatsiyi* [Differential Coding Methods of Waveform in Speech Communication Systems]. Lviv, Ukrainian Academy of Printing, 2006, 320 p. (Ukr)
7. Menshikov G. The discrete-difference approximation (delta-modulation) by Winkler. *Problems of Information Transmission*, 1969, vol. 5, iss. 2, pp. 61-65.
8. Winkler M. R. High information deltamodulation. *IEEE International Convention Record* 8. 1963, pp. 260-265.

Описание статьи для цитирования:

Тимченко О. В., Лозинський В. І. Метод адаптивної дельта-модуляції для довільних коефіцієнтів адаптації у сенсорній мережі мобільного моніторингу ЕКГ. Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2018, № 4, с. 38-43. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.38>

Cite the article as:

Tymchenko O. B., Lozynsky V. I. Adaptive delta modulation method for arbitrary adaptation coefficients in the sensor network of the mobile ECG monitoring. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 4, pp. 38-43. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.4.38>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Добровольський Юрій Георгієвич, докт. техн. наук, доцент, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

Дружинін Анатолій Олександрович, докт. техн. наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка»

Іванець Сергій Анатолійович, канд. техн. наук, доцент, Чернігівський національний технологічний цнверситет

Петліцький Олександр Миколайович, канд. фіз.-мат. наук, директор, ДЦ «Белмікроаналіз», ВАТ «ІНТЕГРАЛ», м. Мінск

Плаксінін Сергій Вікторович, докт. фіз.-мат. наук, зав. відділом, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, м. Дніпро

Рябенський Володимир Михайлович, докт. техн. наук, професор, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Садченко Андрій Валерійович, канд. техн. наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет

Яцунський Ігор Ростиславович, канд. фіз.-мат. наук, заст. декана, Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова

1. До розгляду приймаються статті прикладної спрямованості українською, російською або англійською мовою, що не були опубліковані раніше і не були передані для публікації в інші видання.

2. В журналі публікуються науково-практичні та експериментальні роботи з наступних тематичних напрямків:

- Сучасні електронні технології;
- Нові компоненти для електронної апаратури;
- Електронні засоби: дослідження, розробки;
- НВЧ-техніка;
- Системи передачі та обробки сигналів;
- Мікропроцесорні пристрої та системи;
- Енергетична електроніка;
- Напівпровідникова світлотехніка;
- Біомедична електроніка;
- Сенсоелектроніка;
- Функціональна мікро- та наноелектроніка;
- Забезпечення теплових режимів;
- Технологічні процеси та обладнання;
- Матеріали електроніки;
- Метрологія. Стандартизація.

3. Усі матеріали, які надходять до редакції, піддаються двосторонньому закритому рецензуванню.

4. У разі виявлення плагіату або фальсифікації результатів стаття відхиляється.

5. Редакція не стягує плату за опублікування рукопису та не виплачує авторський гонорар.

6. Обов'язковою умовою для прийняття статті до розгляду є її відповідність загальноприйнятим нормам побудови наукової публікації, тобто в ній мають бути:

— опис проблеми з аналізом публікацій за останні 5 років та обґрунтуванням необхідності проведення дослідження;

— чітко сформульована мета роботи;

— основна частина з обговоренням та інтерпретацією результатів;

— висновки.

Крім цього, редакцію цікавлять наступні аспекти:

— можливість практичного використання результатів досліджень;

— доцільність таблиць, ілюстрацій, у т. ч. відсутність дублювання наведеної в них інформації;

— адекватність використання літературних джерел;

— точність термінології;

— композиція рукопису, у т. ч. виправданість обсягу.

7. Готуючи статтю, слід звернути увагу на наступне:

— назва, мета роботи та висновки мають бути узгоджені між собою;

— назва має бути чіткою, інформативною і водночас по можливості короткою;

— ключові слова підбираються так, щоб ймовірність знаходження статті через пошукові системи була якомога вищою;

— анотація на початку статті має бути досить лаконічною (до 100 слів), демонструвати, що зроблено у роботі, а також містити усі наведені ключові слова;

— вступ знайомить читача з областю досліджень, існуючими в ній проблемами, показує актуальність проведення даного дослідження і закінчується чітко сформульованою метою роботи. Тут необхідно привести огляд літератури за даною тематикою, вказавши на проблеми, які потребують додаткового дослідження і які вирішуються в даній роботі;

— основна частина може містити такі розділи, як «Зразки для досліджень», «Методика досліджень», «Результати досліджень і їх обговорення» та ін. Опис результатів, представлених на рисунках, має містити інтерпретацію цієї інформації, а не зводитися до дублювання підписів під рисунками або до простого опису наведених залежностей. Наприклад, замість таких неінформативних фраз, як «На рис. 1 наведено графік залежності A від B . З рисунка видно, що при зростанні B значення A монотонно зменшується.», слід дати пояснення типу «Як видно з рис. 1, при зростанні B значення A монотонно зменшується, що свідчить про те, що ... »;

— висновки не мають повторювати анотацію — тут потрібно показати, що заявлену мету досягнуто, навести результати роботи та рекомендації щодо їх практичного використання, а також визначити основні напрямки подальших досліджень. Правильно сформулювати висновки допоможуть такі фрази як «Проведене дослідження показало, що ...», «Авторами встановлено, що ...», «Розроблена методика дозволяє ...» тощо.

8. Список «Використані джерела» формується в порядку їх згадування в тексті та оформляється відповідно до наведених нижче вимог. При цьому потрібно мати на увазі наступне:

— не менше половини загальної кількості джерел мають становити статті та монографії, опубліковані за останні п'ять років (до 10 джерел);

— кількість посилань на власні роботи має бути не вище за 25—30% від загальної кількості цитованих джерел;

— не рекомендується включати до списку літератури посилання на нормативні документи (якщо без цього не можна обійтися, краще згадати їх безпосередньо в тексті статті);

— при посиланні у тексті на числові значення, формули та інші фактичні дані, запозичені з книг, слід вказувати не тільки саму книгу, але і сторінку (наприклад, [2, с. 418]).

9. Після статті потрібно привести тематичну інформацію — назву, ПІБ авторів, місце роботи, анотацію і ключові слова — українською, англійською та російською мовами. При цьому перекладні варіанти анотації мають бути представлені в розширеному вигляді (200—250 слів) і відображати всі структурні розділи (актуальність теми, постановку задачі, опис рішення, висновки та практичну значущість).

10. Редакція не ставить жорстких вимог до обсягу статті — головне, щоб він був виправданий. Як правило, тексти статей в «ТКЕА» займають від трьох до шести журнальних сторінок, що відповідає 7—15 сторінкам, набраним у текстовому редакторі Microsoft Word, шрифт Times New Roman, розмір 12, міжрядковий інтервал 1,5.

11. Набір складних формул, а також спеціальних знаків над літерними позначеннями, підкоренових виразів, меж інтегрування, підсумовування тощо необхідно виконувати у програмах типу MathType (не можна користуватися вбудованим у Word формульним редактором), а в решті випадків (прості формули, шрифтові виділення, під/надрядкові індекси тощо) використовувати тільки звичайні засоби Word.

12. Одиниці виміру всіх величин мають відповідати сучасним вимогам, а термінологія — загальноприйнятій. Всі використані символи та аббревіатури потрібно пояснити при першому їх згадуванні у тексті.

13. Бажано, щоб обсяг ілюстрацій не перевищував 40% від загального обсягу статті.

14. На початку статті, крім її назви та інформації про авторів (ПІБ, вчені ступені, місце роботи, e-mail), необхідно вказати індекс за Універсальною десятиковою класифікацією (УДК).

15. Матеріали статті разом з Авторською угодою та Карточкою автора надсилаються до редакції на e-mail <tkea@optima.com.ua>. У тексті супроводжувального листа необхідно вказати ПІБ авторів, назву статті та відповідний тематичний напрямок (див. п. 2).

16. Для цитування статей з журналу «ТКЕА» латинкою слід використовувати його транслітеровану назву, а саме «Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature».

P.s. Для контролю виконання вимог щодо змісту статті автори можуть скористатися критеріями, за якими рукопис буде оцінюватися рецензентом (див. бланк рецензії на сайті).

*Номер готовили
Днепр, Киев, Львов, Минск,
Николаев, Одесса, Ташкент,
Чернигов, Черновцы.*



Пишите
Подписывайтесь
Читайте