

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

ДВАДЦАТЬ ПЕРША МІЖНАРОДНА
НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ



**СУЧАСНІ
ІНФОРМАЦІЙНІ
ТА ЕЛЕКТРОННІ
ТЕХНОЛОГІЇ**

**25–29 травня 2020 року
Україна, м. Одеса**

Реквізити для зв'язку
e-mail <tkea.journal@gmail.com>
тел. +38 099 444 63 52

- Інформаційні технології та захист інформації в електроніці та телекомунікації
- Радіотехнічні, телекомунікаційні та телевізійні системи
- Проектування, конструювання, виробництво та контроль електронних засобів
- Функціональна електроніка. Мікро- та нанотехнології

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

1–2 2020

СІЧЕНЬ — КВІТЕНЬ

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
«ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»**

ISSN 2309-9992 (Online)

Виходить один раз в 2 місяця

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

К. т. н. О. Ф. Бондаренко
(КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна)

РЕДАКЦІЙНА РАДА

Акад. НАНУ, д. ф.-м. н. О. Є. Бєляєв (м. Київ, Україна)
Д. т. н. М. М. Ваків (м. Львів, Україна)
Д. т. н. Г. О. Оборський (м. Одеса, Україна)
К. т. н. В. М. Чміль (м. Київ, Україна)
О. А. Тихонова (м. Одеса, Україна)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

<i>Д. т. н. С. Г. Антошук</i> (м. Одеса, Україна)	<i>Д. т. н. І. Ш. Невлюдов</i> (м. Харків, Україна)
<i>Д. т. н. А. П. Бондарев</i> (м. Львів, Україна)	<i>Dr. Sc. D. Nika</i> (Chisinau, Moldova)
<i>Prof. I. Vajda</i> (Budapest, Hungary)	<i>Д. т. н. Ю. Є. Ніколаєнко</i> (м. Київ, Україна)
<i>Prof. D. Vinnikov</i> (Tallinn, Estonia)	<i>Prof. V. Pires</i> (Setúbal, Portugal)
<i>Prof. I. Galkin</i> (Riga, Latvia)	<i>Д. ф.-м. н. С. В. Плаксін</i> (м. Дніпро, Україна)
<i>К. т. н. Е. М. Глушеченко</i> (м. Київ, Україна), зам. головного редактора	<i>К. т. н. Проконець В. М.</i> (м. Київ, Україна)
<i>К. т. н. Г. Г. Горох</i> (м. Мінськ, Республіка Білорусь)	<i>Prof. E. Romero-Cadaval</i> (Badajoz, Spain)
<i>Prof. K. Dhoska</i> (Tirana, Albania)	<i>К. ф.-м. н. О. В. Рибка</i> (м. Харків, Україна)
<i>Д. ф.-м. н. В. В. Должиков</i> (м. Харків, Україна)	<i>К. т. н. П. С. Сафронов</i> (м. Одеса, Україна), відп. секретар редколегії
<i>Д. т. н. А. О. Дружинін</i> (м. Львів, Україна)	<i>Д. т. н. В. М. Сигорець</i> (м. Київ, Україна)
<i>Д. т. н. А. А. Єфіменко</i> (м. Одеса, Україна), заст. головного редактора	<i>Д. т. н. В. С. Ситніков</i> (м. Одеса, Україна)
<i>Д. ф.-м. н. Д. В. Корбутяк</i> (м. Київ, Україна)	<i>К. т. н. С. А. Степенко</i> (м. Чернігів, Україна)
<i>Д. т. н. С. І. Круковський</i> (м. Львів, Україна)	<i>Dr. Sc. Z. Stević</i> (Belgrade, Serbia)
<i>Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. С. Лисенко</i> (м. Київ, Україна)	<i>Д. х. н. В. М. Томашик</i> (м. Київ, Україна)
<i>Prof. J. Martins</i> (Caparica, Portugal)	<i>К. т. н. В. Є. Трофімов</i> (м. Одеса, Україна)

В редакції можна оформити передплату на журнал або придбати будь-який номер

Контактна інформація

Україна, 65044, м. Одеса, а/с 17;
tkea.journal@gmail.com, www.tkea.com.ua,
+ 38 099 444 63 52.

Редакція

*О. А. Тихонова, А. А. Єфіменко, П. С. Сафронов,
О. О. Алексеєва, М. Г. Глава, Н. М. Колганова. Є. І. Корецька.*

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

2020 № 1–2

Рік видання 44-й

Журнал включено
до Переліку наукових фахових
видань України у галузях
«Технічні науки»,
«Фізико-математичні науки»
(категорія «Б»)
за спеціальностями
105, 122, 132, 141, 151, 152,
163, 171, 172

Входить до міжнародної довідкової
системи з періодичних
та продовжуваних видань Ulrich's
Periodicals Directory (США),
міжнародної системи бібліографічних
посилань CrossRef, бази даних DOAJ,
Open Ukrainian Citation Index (OUCI),
Google Scholar, РИНЦ;
реферується в УРЖ «Джерело»

Номер випущений за підтримки
ОНПУ (м. Одеса),
НВП «Сатурн» (м. Київ),
НВП «Карат» (м. Львів)

Відп. за випуск: О. А. Тихонова

ЗАСНОВНИКИ

Інститут фізики напівпровідників
ім. В. Є. Лашкарьова НАН України;
Науково-виробниче підприємство
«Сатурн»;

Одеський національний
політехнічний університет;
Видавництво «Політехперіодика»

Свідоцтво про реєстрацію
№ КВ 21788-11688ПР
від 21.12.2015 р.

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Особливості модернізації частотоміра UA ЧЗ-101. *Криваль І. І., Скрипнюк А. І., Рудковський А. В., Проценко В. А., Присяжнюк О. А.* (російською) 3

Системи передачі та обробки сигналів

Завадостійка система імпульсної лазерної дальнометрії. *Садченко А. В., Кушніренко О. А., Кошелев Є. К.* (українською) 8
Методика визначення рівня сигналу на вході оптичного приймача технічних засобів розвідки. *Садченко А. В., Кушніренко О. А., Троянський О. В.* (російською)..... 15

Матеріали електроніки

Вплив радіаційних дефектів на електрофізичні та детекторні властивості CdTe:Cl, опроміненого нейтронами. *Кондрік О. І., Ковтун Г. П.* (російською) 22

Енергетична електроніка

Електричні властивості фотогальванічного елемента з вбудованим позисторним шаром на основі полімерного нанокompозиту з вуглецевим наповнювачем. *Іванченко О. В., Тонкошкур О. С.* (російською) 30

Забезпечення теплових режимів

Теплові характеристики рідинного теплообмінника приймально-передавального модуля АФАР. *Ніколаєнко Ю. Є., Баранюк О. В., Рева С. А.* (українською)..... 37

Технологічні процеси та обладнання

Вплив гетерування на процес формування алюмінієвого омічного контакту. *Литвиненко В. М., Баганов Є. О., Вікулін І. М., Горбачов В. Е.* (англійською)..... 45

Рецензенти номера..... 50

Показчик статей, опублікованих у 2019 р..... 51

СОДЕРЖАНИЕ

Электронные средства: исследования, разработки

Особенности модернизации частотомера UA ЧЗ-101.
*Криваль И. И., Скрипнюк А. И., Рудковский А. В.,
Проценко В. А., Присяжнюк О. А.* (3)

Системы передачи и обработки сигналов

Помехоустойчивая система импульсной лазерной даль-
нометрии *Садченко А. В., Кушниренко О. А., Кошелев
Е. К.* (8)

Методика определения уровня сигнала на входе опти-
ческого приемника технических средств разведки.
Садченко А. В., Кушниренко О. А., Троянский А. В. (15)

Материалы электроники

Влияние радиационных дефектов на электрофизиче-
ские и детекторные свойства CdTe:Cl, облученного
нейтронами. *Кондрик А. И., Ковтун Г. П.* (22)

Энергетическая электроника

Электрические свойства фотогальванического элемен-
та со встроенным позисторным слоем на основе поли-
мерного нанокompозита с углеродным наполнителем.
Иванченко А. В., Тонкошкур А. С. (30)

Обеспечение тепловых режимов

Тепловые характеристики жидкостного теплообмен-
ника приемо-передающего модуля АФАР. *Николаенко
Ю. Е., Баранюк А. В., Рева С. А.* (37)

Технологические процессы и оборудование

Влияние геттерирования на процесс формирования
алюминиевого омического контакта. *Литвиненко В. Н.,
Баганов Е. А., Викулин И. М., Горбачев В. Э.* (45)

Указатель статей, опубликованных в 2019 г. (51)

CONTENTS

Electronic devices: research, development

Aspects of modernization of UA ЧЗ-101 frequency meter.
*Krival' I. I., Skripnyuk A. I., Rudkovskiy A. V., Protsenko
V. A., Prisyazhnyuk O. A.* (3)

Signals transfer and processing systems

Anti-interference pulsed laser ranging system. *Sadchenko
A. V., Kushnirenko O. A., Koshelev E. K.* (8)

Method of determining the signal level at the input of the
optical receiver of surveillance equipment. *Sadchenko
A. V., Kushnirenko O. A., Troyanskiy A. V.* (15)

Materials of electronics

Influence of radiation defects on the electrophysical and
detector properties of CdTe:Cl irradiated by neutrons.
Kondrik A. I., Kovtun G. P. (22)

Power electronics

Electrical properties of photogalvanic element with built-
in posistor layer based on polymer nanocomposite with
carbon filler.
Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. (30)

Thermal management

Thermal characteristics of the liquid heat exchanger for
the transmitter/reciever module of APAA. *Nikolaenko
Yu. E., Baranyuk O. V., Reva S. A.* (37)

Production technology and equipment

Influence of gettering on aluminum ohmic contact
formation. *Litvinenko V. N., Baganov Ye. A., Vikulin I. M.,
Gorbachev V. E.* (45)

Index of articles published in the journal in 2019 (51)

И. И. КРИВАЛЬ, А. И. СКРИПНЮК, А. В. РУДКОВСКИЙ,
к. т. н. В. А. ПРОЦЕНКО, О. А. ПРИСЯЖНЮК

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

ОСОБЕННОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ЧАСТОТОМЕРА UA ЧЗ-101

Описаны технические решения по замене трудоемких СВЧ-узлов морально устаревшего частотомера UA ЧЗ-101 8-миллиметрового диапазона длины волны, таких как входные СВЧ-преобразователи в микрополосковом и волноводном исполнении, а также оптимизированный алгоритм процесса измерения частоты входного сигнала, что позволило провести модернизацию прибора.

Ключевые слова: частотомер, преобразователь частоты, модернизация, миллиметровый диапазон длины волны.

В свое время в ОАО «Меридиан» им. С. П. Королева был разработан и серийно выпускался широкодиапазонный СВЧ-частотомер 8-миллиметрового диапазона длины волны UA ЧЗ-101. Однако со временем прибор по ряду причин морально устарел, и возник вопрос о его замене. Стоимость имеющихся на рынке зарубежных моделей частотомеров с аналогичными параметрами (например, CNT90-XL (40 ГГц), Pendulum, Швеция [1]), составляет порядка 20 тыс. долл. США, поэтому были рассмотрены собственные возможности в решении этого вопроса. Анализ показал, что разработка нового аналогичного частотомера также обойдется достаточно дорого, а вот модернизация имеющегося — в два-три раза дешевле, поскольку на предприятии имеется вся необходимая для серийного выпуска модернизированного частотомера инфраструктура.

В настоящей статье описаны технические решения по замене трудоемких СВЧ-узлов частотомера UA ЧЗ-101, таких как входные СВЧ-преобразователи в микрополосковом и волноводном исполнении, а также оптимизация алгоритма процесса измерения частоты входного сигнала, что позволило провести модернизацию прибора в соответствии с выдвигаемыми требованиями.

Общий принцип построения частотомера был рассмотрен в [2], а в [3] были приведены рекомендации по выбору оптимальных параметров основных узлов прибора, таких как входной преобразователь частоты, полосовой усилитель промежуточной частоты, синтезатор частот.

Рассмотрим кратко проблемные вопросы, которые имели место при серийном выпуске частотомера UA ЧЗ-101.

Особенности производства частотомера UA ЧЗ-101

С точки зрения трудоемкости изготовления и связанной с ней стоимости прибора, на первом месте стоят входные СВЧ-преобразователи частоты, которые переносят входную измеряемую частоту в диапазон промежуточных частот непосредственного счета счетчиком частотомера. В диапазоне частот до 18 ГГц функцию преобразователя частоты выполняет стробоскопический смеситель, реализованный в микрополосковом исполнении в виде микросборки. Для его изготовления необходимо иметь специфическое, дорогостоящее производство — микроэлектронику.

Еще одна проблема связана с тем, что в генераторе стробирующих импульсов пикосекундной длительности используются диоды с накоплением заряда типа 2Д528А и диод 2Д528Ж, которые в настоящее время не выпускаются.

В диапазоне частот от 18 до 40 ГГц в частотомере используются трудоемкие в изготовлении СВЧ-преобразователи, реализованные в волноводном исполнении с сечением канала волноводов 7,2×3,4 и 11×5,5 мм, перестраиваемые волноводные аттенюаторы с сечением канала волновода 7,2×3,4 и 11×5,5 мм, а также волноводные переходы с сечения на сечение. На замену им был разработан сверхширокополосный модуль преобразователя частоты (стробоскопический смеситель) в диапазоне частоты от 0,2 до 40 ГГц с коаксиальным входом с сечением 2,92×1,27 мм, который с успехом заменил микросборку и волноводные преобразователи частоты.

Практическая реализация модуля преобразователя частоты

Модуль преобразователя частоты, работающий по принципу стробоскопического смесителя, построен на микросхеме типа RTN090 фирмы Teledyne

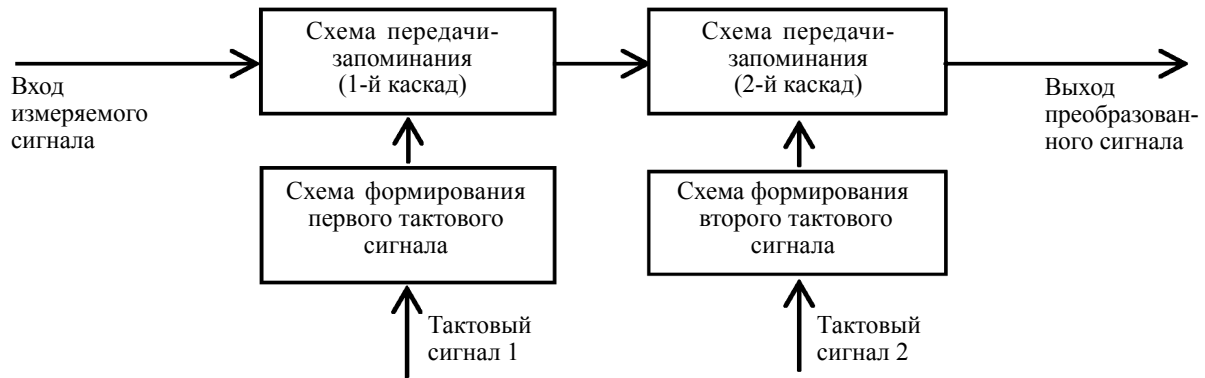


Рис. 1. Функциональная схема преобразователя частоты на микросхеме RTH090

Scientific Company, США. Он представляет собой два последовательно соединенных каскада передачи и запоминания (track-and-hold), построенных на дифференциальных транзисторных усилителях, управляемых тактовыми сигналами. В частотомере в качестве тактовых сигналов используются сигналы с выхода синтезатора частот, автоматически перестраиваемого в диапазоне от 329 до 476 МГц.

Функциональная схема преобразователя частоты приведена на **рис. 1**. Работа первого каскада передачи-запоминания происходит следующим образом. На положительной полуволне тактового сигнала входной измеряемый сигнал передается с заданным коэффициентом передачи на выход (режим передачи). При отрицательной полуволне тактового сигнала на выходной емкости $C_{\text{зап1}}$ (рис. 2, а) каскада запоминается постоянный уровень напряжения ΔU_1 (рис. 2, б, в), равный по величине входному измеряемому сигналу в момент перехода тактового сигнала с положительной полуволны на отрицательную (режим

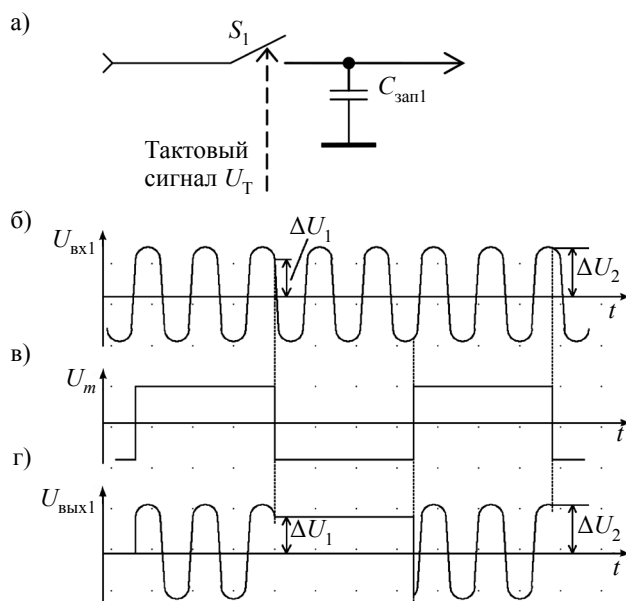


Рис. 2. Схема и эпюры напряжений первого каскада передачи-запоминания

запоминания). Это можно представить в виде условного разомкнутого ключа S_1 (рис. 2, а).

Второй каскад передачи-запоминания также можно условно представить в виде ключа S_2 и запоминающей емкости $C_{\text{зап2}}$ (рис. 3, а). Он работает аналогично первому, отличие заключается в том, что тактовый сигнал на него подается в противофазе тактовому сигналу, поступающему на первый каскад. Условно это показано в виде инвертора D на рис. 3, а. Следовательно, когда первый каскад находится в режиме запоминания (тактовый сигнал U_T отрицательный), второй каскад находится в режиме передачи (тактовый сигнал положительный) и передает постоянное напряжение ΔU_1 на выход преобразователя. Когда же фаза тактового сигнала изменится на противоположную, второй каскад перейдет в режим запоминания и на его выходе будет удерживаться напряжение ΔU_1 . В следующем

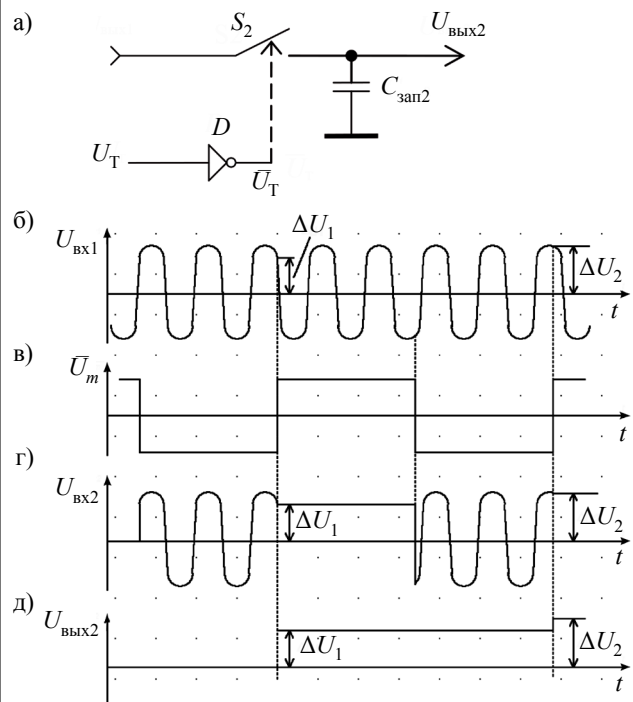


Рис. 3. Схема и эпюры напряжений второго каскада передачи-запоминания

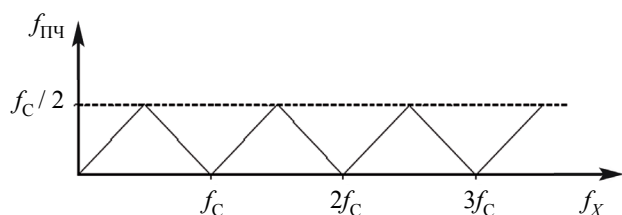


Рис. 4. График зависимости промежуточной частоты $f_{ПЧ}$ от частоты входного сигнала f_X

периоде тактового сигнала первый каскад запомнит напряжение ΔU_2 на выходе (рис. 3, б, з, д), которое поступает на вход второго каскада.

Таким образом, на выходе микросхемы получается ступенчатое напряжение с значениями напряжения ступенек ΔU_1 , ΔU_2 и т. д., равными величине входного сигнала (умноженного на коэффициент передачи микросхемы) в моменты перехода тактового сигнала с положительной полуволны на отрицательную. По сути происходит ступенчатая аппроксимация входного сигнала только в увеличенном во времени масштабе. Значения частоты ступенек равны частоте тактового сигнала, то есть частоте синтезатора f_C частотомера. После фильтрации частоты синтезатора и его гармоник фильтром нижних частот в усилителе промежуточной частоты на его выходе будет иметь место преобразованный сигнал промежуточной частоты $f_{ПЧ}$.

Из рис. 4 видно, что при стробоскопическом преобразовании максимальная преобразованная частота $f_{ПЧ \max}$ будет равна половине частоты синтезатора f_C :

$$f_{ПЧ \max} = f_C / 2. \quad (1)$$

В преобразователе частоты синтезатор перестраивается в диапазоне от 329 до 476 МГц, а промежуточная частота лежит в полосе от 39 до 135 МГц.

Конструктивно преобразователь выполнен в виде экранированного модуля размерами 53×48×15 мм. Плата преобразователя частоты находится в корпусе модуля, она изготовлена из сверхвысокочастотного фольгированного диэлектрика N9000 фирмы Nelco Products, США. На боковых стенках модуля расположены две розетки типа МСХ: одна предназначена для подачи сигнала тактовой частоты синтезатора f_C , другая — для съема выходного сигнала промежуточной частоты $f_{ПЧ}$ (продукт преобразования). Входной измеряемый сигнал частотой f_X подается на розетку сечением 2,92×1,27 мм, расположенную на боковой стенке модуля. Питание на модуль (напряжением –5,2 В) поступает через фильтр типа МЗЛ333А, расположенный на боковой поверхности модуля.

Оптимизация алгоритма процесса измерения частоты входного сигнала

В связи с использованием в модернизированном частотомере широкополосного входного преобразователя частоты с коаксиальным входом возникла не-

обходимость в оптимизации алгоритма процесса измерений.

В общем виде алгоритм измерения приведен в [2]. Вычисление входной измеряемой частоты происходит по формуле

$$f_X = N f_C \pm f_{ПЧ}, \quad (2)$$

где N — номер гармоники частоты синтезатора f_C , на которой произошло преобразование входного сигнала f_X .

Алгоритм измерения частоты в диапазоне частот от 0,2 до 18 ГГц будет выглядеть следующим образом.

1. Синтезатор частоты автоматически перестраивается до получения промежуточной частоты $f_{ПЧ1}$ при частоте синтезатора f_{C1} .

2. Частота синтезатора увеличивается или уменьшается на 1,6 МГц, проверяется наличие признака ПЧ, и это повторяется до получения признака ПЧ.

2.1. Если условие п. 2 не выполняется, то частота синтезатора возвращается в положение f_{C1} . После этого дается приращение Δf_C , равное «+» или «-» 0,6 МГц, до получения признака ПЧ. Если признак ПЧ имеет место, то выполняется переход к п. 3. Если признак ПЧ отсутствует, то частота синтезатора возвращается в положение f_{C1} , которому соответствует промежуточная частота $f_{ПЧ1}$.

2.2. Дается приращение частоты синтезатора Δf_C , равное «+» или «-» 0,4 МГц, до получения признака ПЧ. Если признак ПЧ имеет место, то выполняется переход к п. 3. Если признак ПЧ отсутствует, то частота синтезатора возвращается в положение f_{C1} .

2.3. Дается приращение частоты синтезатора Δf_C , равное –0,2 МГц, до получения признака ПЧ. Если признак ПЧ имеет место, то выполняется переход к п. 3.

3. Измеряется $f_{ПЧ2}$, которой будет соответствовать частота синтезатора f_{C2} .

4. Определяется номер гармоники N_1 :

$$N_1 = \frac{|f_{ПЧ2} - f_{ПЧ1}|}{|f_{C2} - f_{C1}|} = \frac{|f_{ПЧ2} - f_{ПЧ1}| \text{ МГц}}{1,6 \text{ МГц}}. \quad (3)$$

Для определения 2-го номера гармоники N_2 частота синтезатора приравняется к первоначальному значению f_{C1} , для определения 3-го номера гармоники N_3 делается приращение частоты синтезатора на 1,6 МГц, и так продолжается пять циклов до получения всех пяти номеров гармоник: от N_1 до N_5 .

В общем виде формула определения номера гармоники N_i выглядит следующим образом:

$$N_i = \frac{|f_{ПЧ(i+1)} - f_{ПЧi}| \text{ МГц}}{1,6 \text{ МГц}}, \quad (4)$$

где $i = 1-5$.

В процессоре происходит округление значения номера гармоники до целого числа.

5. Проверяется равенство $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = N_5 = N$.

6. При выполнении равенства определяется искомая частота f_X :

$$f_X = N f_{C6} \pm f_{ПЧ6} \quad (5)$$

Знак «+» или «-» перед $f_{ПЧ6}$ берется в зависимости от того, как изменяется $f_{ПЧ}$ от знака приращения частоты синтезатора Δf_C . Если при уменьшении частоты синтезатора значение $f_{ПЧ}$ уменьшается, то перед $f_{ПЧ6}$ ставится знак «+», если же наоборот — знак «-».

Следует отметить, что в формуле (5) промежуточная частота $f_{ПЧ6}$ используется по той причине, что она соответствует частоте синтезатора f_{C6} в последнем цикле измерения номера гармоники и учитывает все «уходы» измеряемой частоты за время измерения.

Алгоритм измерения частоты в других диапазонах аналогичен приведенному, разница лишь в величине приращений частот синтезатора Δf_C .

При измерении частоты в диапазоне от 18 до 25 ГГц первое приращение Δf_C равно $\pm 1,2$ МГц, а последующие, при необходимости, равны ± 400 и -200 кГц соответственно. Синтезатор в этом случае перестраивается от значения 458,4 до значения 470,4 МГц.

При измерении частоты в диапазоне от 25 до 40 ГГц первое приращение Δf_C равно 800 кГц, далее ± 200 и -400 кГц, а синтезатор перестраивается от значения 470,4 до 458,4 МГц.

Результаты модернизации

Использование в модернизированном частотомере UA ЧЗ-101А (см. **рис. 5, таблицу**) разработанного широкополосного малогабаритного преобразователя частоты позволило максимально упростить схему и сам процесс измерения частоты, использовать только один входной СВЧ-преобразователь, значительно уменьшить массогабаритные показатели прибора, отказаться от трудоемких и дорогостоящих волноводных узлов прибора, в два раза увеличить чувствительность модернизированного частотомера.

Предложенное техническое решение позволило упростить процесс производства частотомера, сделать прибор более удобным в эксплуатации. Кроме того, за счет оптимизации схемных и конструкторских решений в модернизированном частотомере уда-

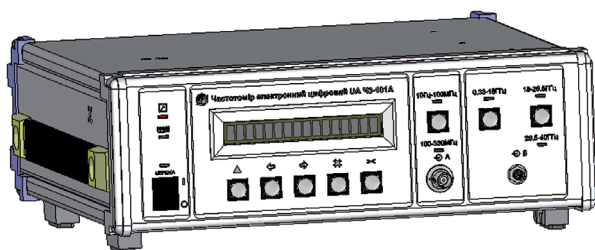


Рис. 5. Модернизированный частотомер UA ЧЗ 101А

Технические характеристики модернизированного частотомера UA ЧЗ-101А

Диапазон измеряемых частот	10 Гц — 40 ГГц
Уровень мощности в импульсе входных ИМ сигналов: минимальный максимальный	40 мВ, 10 мкВт, 50 мкВт 10 мВт
Стабильность частоты опорного генератора в течение 30 суток 12 месяцев	$\pm 10^{-8}$ $\pm 10^{-7}$
Разрешающая способность	1 Гц/с
Потребляемая мощность	45 В·А
Питание прибора	220 \pm 22 В, 50 Гц
Условия эксплуатации	от -10 до +50°C
Масса	4,5 кг
Габариты	307×115×312 мм
Интерфейс	КОП, RS-232
Вход прибора	Коаксиальный с сечением 2,92×1,27 мм

лось совместить на одной плате счетчик и формирователь строка, блок опорных частот совместить с перестраиваемым генератором 100 МГц, отказаться от коммутатора, что позволило уменьшить энергопотребление и повысить надежность прибора.

Заключение

Таким образом, разработанные технические решения позволили заменить трудоемкие СВЧ-узлы частотомера UA ЧЗ-101 и оптимизировать алгоритм процесса измерения частоты входного сигнала.

Модернизированный прибор выполнен на современной элементной базе, малогабаритен, обладает высокими точностными характеристиками и параметрами надежности, при том что его стоимость намного меньше, чем у имеющихся на рынке аналогов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. *Pendulum Instruments*. <https://pendulum-instruments.com/products/frequency-counters-analyzers/cnt-90xl-microwave-frequency-counter-analyzer/>
2. Криваль И.И., Скрипнюк А.И., Проценко В.А., Марьенко А.В. Малогабаритные цифровые частотомеры сверхвысокочастотного диапазона. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2009, № 5, с. 54–57.
3. Криваль И.И., Скрипнюк А.И., Проценко В.А., Марьенко А.В. Выбор оптимальных параметров некоторых узлов частотомеров СВЧ-диапазона. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2011, № 3, с. 10–13.

Дата поступления рукописи
в редакцию 12.02 2020 г.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.03
УДК 621.317-761-029.6.083.92-181-4

I. I. КРИВАЛЬ, А. I. СКРИПНЮК, А. В. РУДКОВСЬКИЙ,
В. А. ПРОЦЕНКО, О. А. ПРИСЯЖНЮК

Україна, м. Київ, ВАТ «Меридіан» ім. С. П. Корольова
E-mail: Feedback@meridian.kiev.ua

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЧАСТОТОМІРА UA ЧЗ-101

Свого часу в ВАТ «Меридіан» ім. С. П. Корольова був розроблений і серійно випускався широкодіапазонний НВЧ-частотомір 8-міліметрового діапазону довжини хвилі UA ЧЗ-101. Однак з часом прилад з ряду причин морально застарів, і постало питання необхідності його заміни. Оскільки вартість наявних на ринку зарубіжних моделей частотомірів з аналогічними параметрами є досить великою, були розглянуті можливості підприємства у вирішенні цього питання. Аналіз показав, що розробка нового аналогічного частотоміру також обійдеться досить дорого, а ось модернізація наявного — набагато дешевше, оскільки на підприємстві є вся інфраструктура для серійного випуску модернізованого частотоміра.

У статті описані технічні рішення по заміні трудомістких НВЧ-вузлів частотоміра UA ЧЗ-101, як от вхідні НВЧ-перетворювачі в мікросмужкових і хвилеводному виконанні, а також оптимізація алгоритму процесу вимірювання частоти вхідного сигналу, що дозволило провести модернізацію приладу відповідно до висунутих вимог.

Використання в модернізованому частотомірі UA ЧЗ-101А розробленого широкосмугового малогабаритного перетворювача частоти дозволило максимально спростити схему та сам процес вимірювання частоти, використовувати тільки один вхідний НВЧ-перетворювач, значно зменшити масогабаритні показники приладу, відмовитися від трудомістких і дорогих хвилеводних вузлів приладу, в два рази збільшити чутливість модернізованого частотоміра.

Запропоноване технічне рішення дозволило спростити процес виробництва частотоміра, зробити прилад більш зручним в експлуатації. Крім того, за рахунок оптимізації схемних і конструкторських рішень в модернізованому частотомірі вдалося поєднати на одній платі лічильник і формувач стробу, блок опорних частот поєднати з перестроюваним генератором 100 МГц, відмовитися від комутатора, що дозволило зменшити енергоспоживання і підвищити надійність приладу.

Ключові слова: частотомір, перетворювач частоти, модернізація, міліметровий діапазон довжини хвилі.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.03
UDC 621.317-761-029.6.083.92-181-4

I. I. KRIVAL', A. I. SKRIPNYUK, A. V. RUDKOVSKIY,
V. A. PROTSSENKO, O. A. PRISYAZHNYUK

Ukraine, Kyiv, JSC «Meridian» n.a. S. P. Korolyov
E-mail: Feedback@meridian.kiev.ua

ASPECTS OF MODERNIZATION OF UA ЧЗ-101 FREQUENCY METER

JSC «Meridian» n. a. S. P. Korolyov at one point developed and mass-produced a wide-range microwave frequency meter of the 8-mm wavelength range UA ЧЗ-101. Over time, however, the device has become obsolete for a number of reasons, and the question arose of the need to replace it. Since the cost of foreign models of frequency meters with similar parameters available on the market is quite high, the enterprise's capabilities in solving this issue were considered. The analysis showed that the development of a new similar frequency meter will also be quite expensive, but the modernization of the existing one might be much cheaper, since the enterprise has all the infrastructure for serial production of the upgraded frequency meter.

This article describes technical solutions for the replacement of labor-consuming microwave components of the UA ЧЗ-101 frequency meter, such as microstrip and waveguide input microwave converters, as well as optimization of the frequency measuring process of the input signal, which allowed us to upgrade the device according to the requirements.

The use of the developed broadband small-sized frequency converter in the modernized UA ЧЗ-101A frequency meter made it possible to simplify the circuit and the frequency measurement process as much as possible, to use only one input microwave converter, to significantly reduce the weight and size of the device, to abandon the labor-consuming and expensive waveguide components of the device, and to double the sensitivity upgraded frequency meter.

The proposed technical solution allowed simplifying the production process of the frequency meter, making the device more convenient to use. In addition, due to the optimization of circuit and design solutions in the upgraded frequency meter, it was possible to combine the counter and the gate driver on the same board, combine the reference frequency block with a 100 MHz tunable generator, abandon the switch, which allowed reducing power consumption and increasing the reliability of the device.

Key words: frequency meter, frequency converter, modernization, millimeter wavelength range.

REFERENCES

1. Pendulum Instruments. <https://pendulum-instruments.com/products/frequency-counters-analyzers/cnt-90x1-microwave-frequency-counter-analyzer/>
2. Krival I. I., Skrypnyuk A. I., Protsenko V. A., Marjenko A. V. Small size digital frequency counters of high-frequency range.

Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature, 2009, no. 5, pp. 54–57 (Rus)

3. Krival I. I., Skrypnyuk A. I., Protsenko V. A., Marjenko A. V. Choosing the optimal parameters of some frequency meter's units of microwave band. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2011, no. 3, pp. 10–13 (Rus)

Описание статьи для цитирования:

Криваль И. И., Скрипнюк А. И., Рудковский А. В., Проценко В. А., Присяжнюк О. А. Особенности модернизации частотомера UA ЧЗ-101. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 1–2, с. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.03>

Cite the article as:

Krival' I. I., Skripnyuk A. I., Rudkovskiy A. V., Protsenko V. A., Prisyazhnyuk O. A. Aspects of modernization of UA ЧЗ-101 frequency meter. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 1–2, pp. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.03>

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНІРЕНКО, Є. К. КОШЕЛЄВ

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: koa@onu.ua

ЗАВАДОСТІЙКА СИСТЕМА ІМПУЛЬСНОЇ ЛАЗЕРНОЇ ДАЛЬНОМЕТРІЇ

Запропоновано структурну схему імпульсного лазерного далекоміра з можливістю виявлення імпульсних завад, які діють в межах його дальності, та виправлення помилок, що виникають в структурі відбитого від цілі сигналу. Основою схеми далекоміра є логічний узгоджений фільтр, який реалізує операцію логічної згортки і структура якого не містить помножувачі. На основі вимог до кодуєчих послідовностей були знайдені оптимальні структури бінарних зондуючих сигналів довжиною 8, що забезпечують найкращу коректуючу здатність. Також виконано порівняння кореляційних властивостей знайдених послідовностей та послідовностей, побудованих за допомогою функцій Уолша.

Ключові слова: лазерна дальнометрія, логічна згортка, функції Уолша, бінарні послідовності, логічний узгоджений фільтр.

Застосування імпульсних лазерних далекомірів на відстанях кілька десятків кілометрів має велику економічну і практичну доцільність завдяки їхній компактності, мобільності та енергоефективності [1].

На **рис. 1** наведено узагальнену схему імпульсного лазерного далекоміра та епюри сигналів в контрольних точках. Принцип його дії ідентичний дії імпульсного локатора. Генератор зондуючого сигналу з деяким періодом повторення T_{Π} виробляє короткий відеоімпульс. Тривалість імпульсу забезпечує необхідну роздільну здатність по дальності, а період повторення вибирається виходячи з максимальної дальності. Після посилення сигналу відбувається амплітудна маніпуляція лазерного випромінюван-

ня. Зондувальний імпульс (позначений на схемі як «Start») своїм заднім фронтом запускає лічильник відміток дальності. Відмітки дальності формуються генератором вузьких стробів T_C — два імпульси на тривалості зондуючого сигналу. Лічильник відміток дальності зупиняється переднім фронтом сигналу з оптичного приймача, пропущеного через компаратор. Якщо відбитий сигнал відсутній, дані лічильника скидаються автоматично. Підрахована кількість відміток дальності (N_D) перекладається в значення дальності і відображається на індикаторі.

Слід зазначити, що за наявності імпульсних завад, які впливають на вхід оптичного приймача як в період зондування, так і в момент прийняття від-

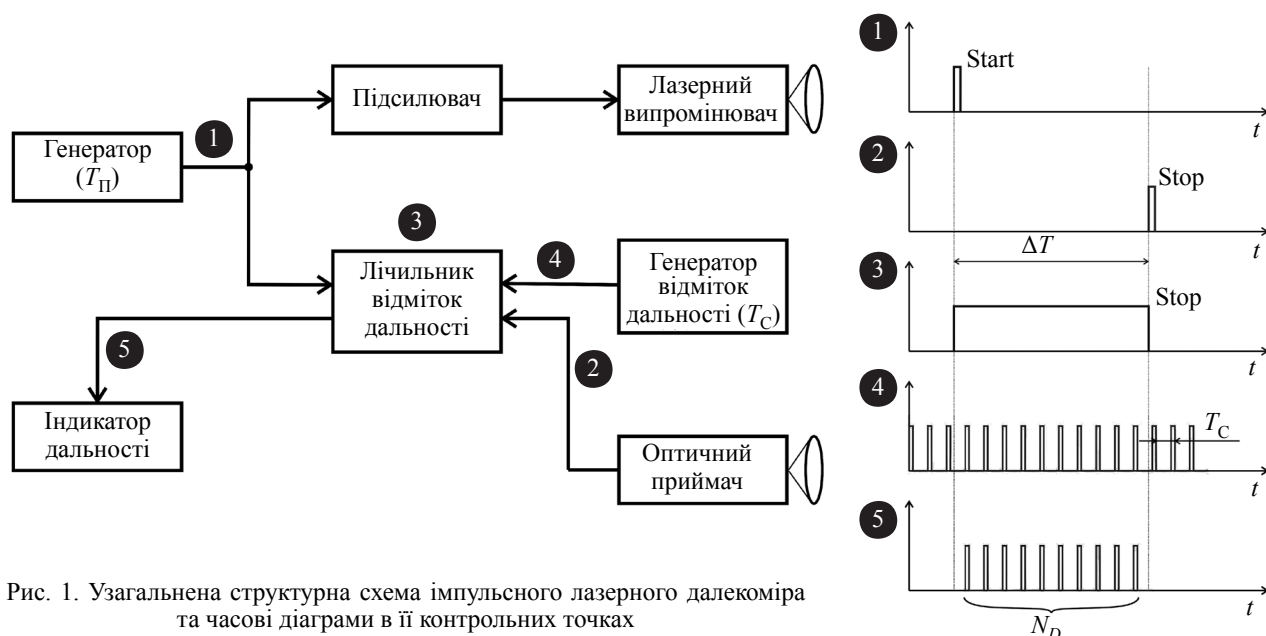


Рис. 1. Узагальнена структурна схема імпульсного лазерного далекоміра та часові діаграми в її контрольних точках

битого сигналу, достовірність вимірювань знижується. Одним із способів боротьби з даною проблемою є багаторазовий повтор вимірювань відстані з усередненням результатів [2—5], однак він не підходить у тих випадках, коли необхідно вимірювати відстань до рухомого об'єкта або контролювати його швидкість, крім того, даний метод не гарантує збіжність результатів вимірювання.

В [6] запропоновано алгоритм вимірювання фазових зсувів у фазових лазерних далекомірних системах, який дозволяє без застосування автоматичного калібрування істотно зменшити випадкову похибку вимірювання, яка обумовлена дією флікер-шуму. При цьому вплив широкосмугових завад зменшується за рахунок усереднення багаторазових вибірок значень синусоїдальної і косинусоїдальної складових сигналу, що використовуються для оцінки фазового зсуву, пропорційного вимірюваній відстані. Однак запропонований алгоритм не гарантує достовірність результатів вимірювань в умовах імпульсних завад.

В [7] завадостійкість імпульсного лазерного далекоміра на тлі пасивних завад забезпечується завдяки адаптивному керуванню потужністю та тривалістю випромінюваних імпульсів, а також шириною смуги пропускання приймального тракту. При цьо-

му даний підхід не дозволяє виявляти та забезпечувати коректну роботу пристрою в умовах активних імпульсних завад.

В даній роботі розроблено структурну схему імпульсного лазерного далекоміра, що забезпечує високу достовірність результатів вимірювання відстані до рухомої цілі в умовах імпульсних завад.

Дослідження проводилися в хмарному сервісі середовища математичного моделювання MATLAB.

У дослідженнях зроблено припущення, що імпульсні завади впливають на оптичний приймач і мають енергію, порівнянну з енергією зонduючого сигналу, отже, мають і порівняну тривалість, при цьому роблять неможливим коректне вимірювання відстані. Джерелами завад можуть бути як випромінювання аналогічних далекомірів в тому ж діапазоні частот, так і навмисно створені завади.

Основні типи імпульсних завад наведено на **рис. 2**. Зазначимо, що тут і далі проводилось моделювання залежностей рівня напруги від нормованого (до тривалості одного елемента сигналу τ_{puls}) часу Nt/τ_{puls} .

Підвищити достовірність результатів вимірювань можна завдяки виявленню завад та виправленню похибки у відбитому від цілі сигналі. При цьому одночасно виявити імпульсні завади та виправити по-

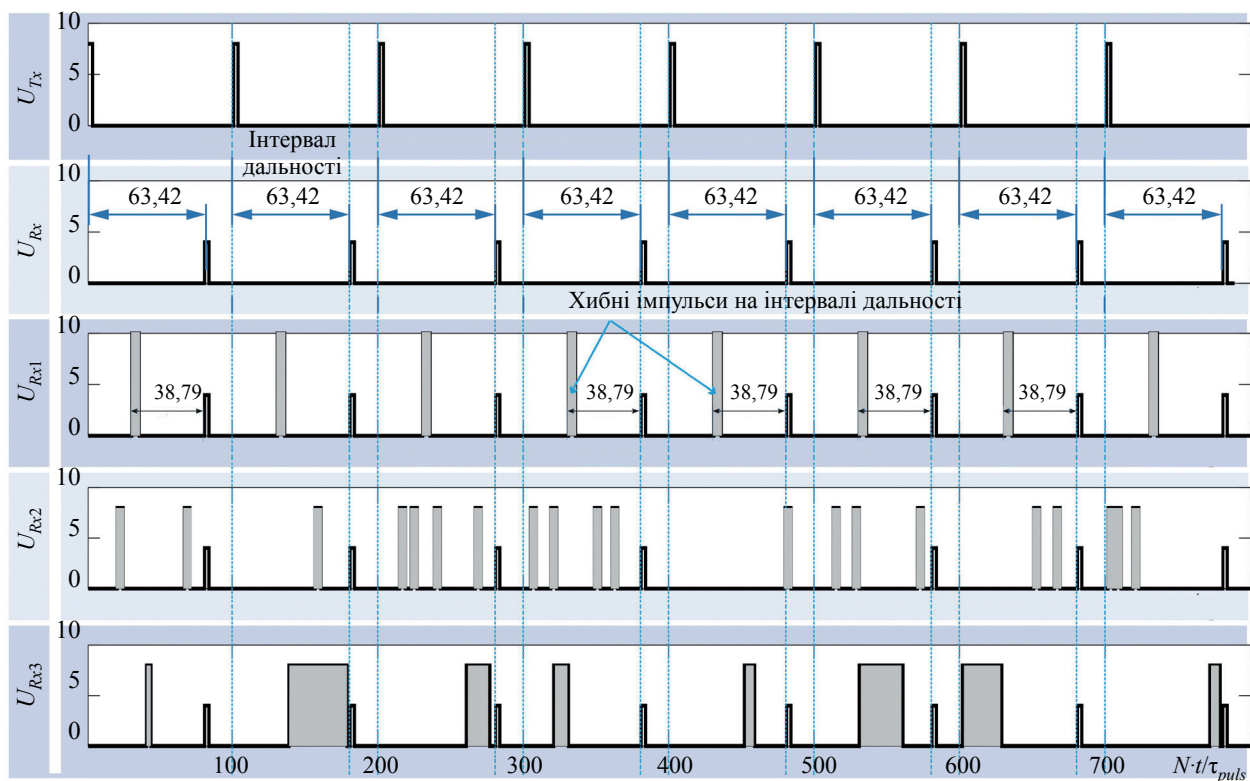
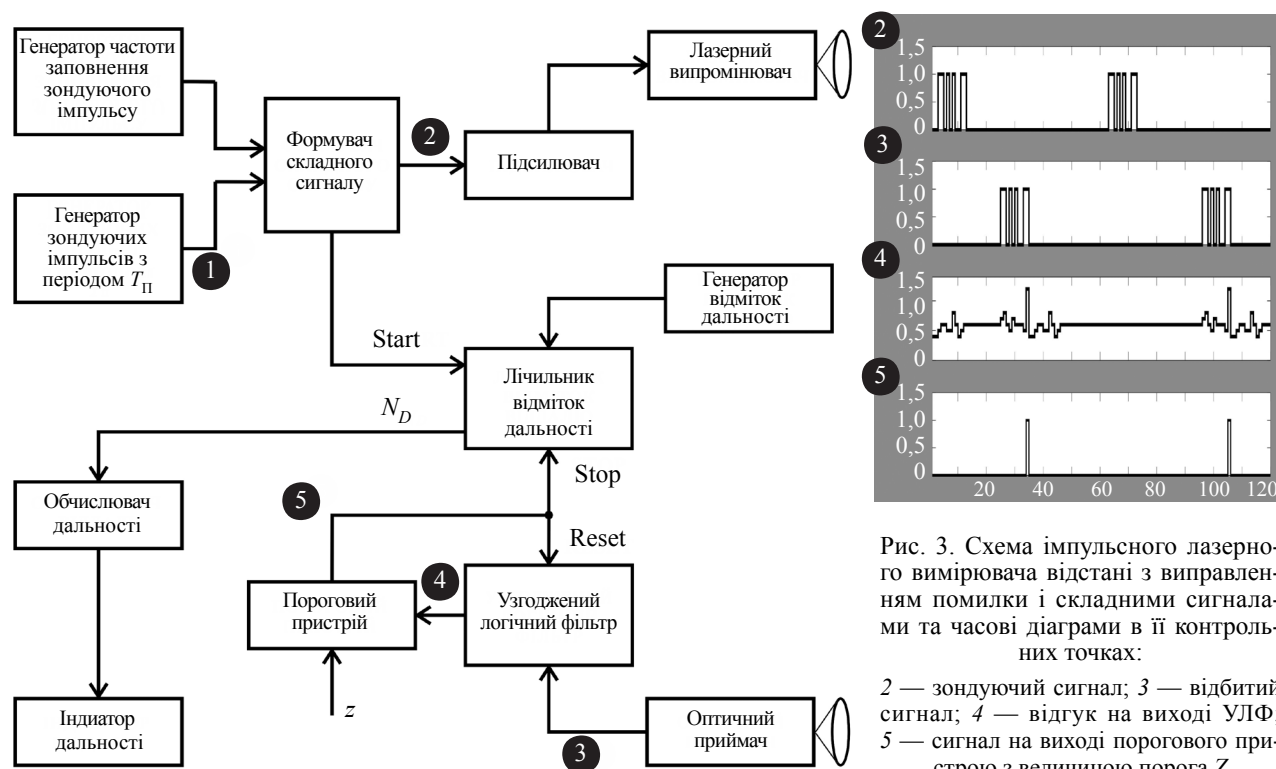


Рис. 2. Залежності рівня напруги сигналу від нормованого часу (зверху вниз):

U_{Tx} — випромінюваний сигнал; U_{Rx} — прийнятий сигнал;
 U_{Rx1} — періодична послідовність імпульсів «помилкова відстань»;
 U_{Rx2} — хаотична послідовність імпульсів; U_{Rx3} — ШІМ-послідовність



хибки можна тільки за допомогою складних зонduючих сигналів.

Розглянемо наведену на **рис. 3** схему лазерного далекоміра з використанням складних сигналів.

У передавальній частині вона містить формувач бінарного складного сигналу, а в приймальній — узгоджений з ним фільтр. Як тільки відгук автокореляційної функції на виході узгодженого фільтра перевищить граничне значення, лічильник відміток дальності зафіксує потрібний результат (кількість відміток дальності N_D).

Складний сигнал формується завдяки імпульсній модуляції тривалості зонduючого імпульсу, як показано на епюрах в контрольних точках 2 і 3 схеми. Оскільки вихідний сигнал фотоприймача бінарний, тобто відповідає логічним «0» та «1», то й узгоджений фільтр замість операції множення має використовувати операцію порівняння за модулем 2.

Відгук на виході узгодженого логічного фільтра (УЛФ) (контрольна точка 4) буде визначатися відповідно до виразу

$$R(n) = S * h = \sum_{m=0}^N S(m) \oplus h(n-m), \quad n = \overline{0, N+M-2}, \quad (1)$$

де $S(m)$, $h(n)$ — дискретні відліки сигналу та імпульсної характеристики узгодженого фільтра;

* — операція згортки;

\oplus — операція виключаючого складання за модулем 2 з інверсією.

Бінарний код довжиною 8 та імпульсну характеристику УЛФ для такої послідовності наведено на **рис. 4**, а його структурну схему — на **рис. 5**.

Для підвищення завадостійкості зонduючий сигнал має задовольняти наступним критеріям:

- послідовність, що кодує зонduючий сигнал, має задовольняти умовам збалансованості чи мати вагу $W = N/2$, де N — довжина послідовності, парне число;
- рівень бічних пелюстків логічної автокореляційної функції (1) має бути якомога меншим;
- першим імпульсом складного зонduючого сигналу має бути рівень логічної одиниці.

Переліченим вимогам задовольняють рядки матриць Адамара [8], які пропонуємо використовувати для кодування інтервалу зонduючого сигналу.

Результати моделювання сигналів схеми лазерного вимірювача відстані з використанням складних сигналів на базі функцій Уолша — Адамара довжиною 8 наведені на **рис. 6**. Аналіз показує, що за наявності завад, сумарна тривалість яких досягає 40% від три-

Послідовність ($N = 8$)	{1 0 0 1 0 1 1 0}
Імпульсна характеристика	{0 1 1 0 1 0 0 1}

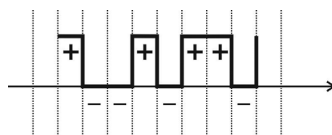


Рис. 4. Бінарний код довжиною $N = 8$ та імпульсна характеристика УЛФ

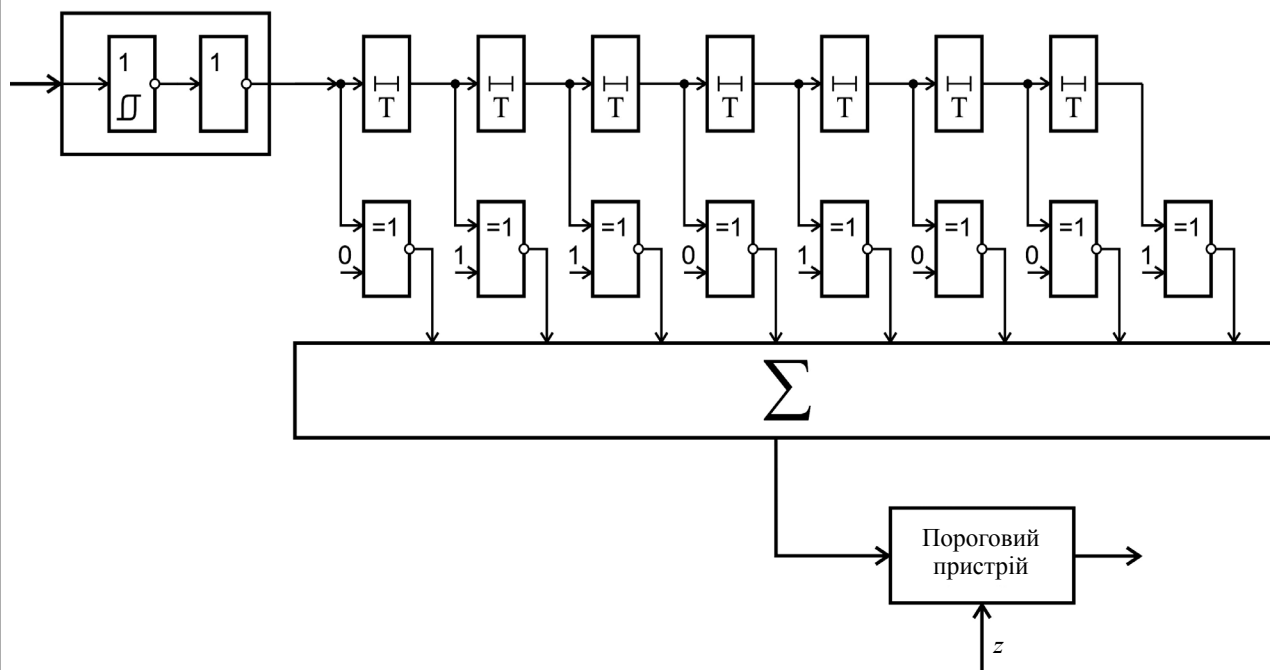
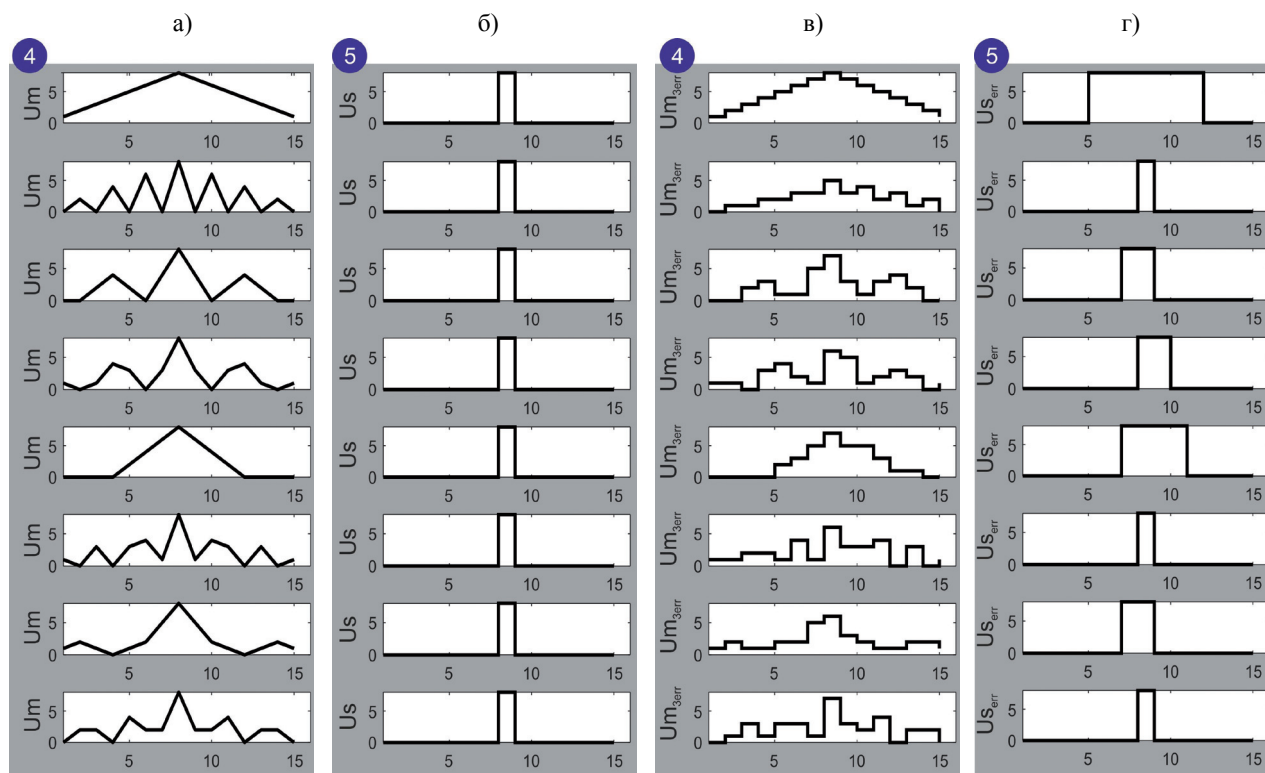
Рис. 5. Структурна схема узгодженого логічного фільтра для бінарної послідовності довжиною $N = 8$ 

Рис. 6. Результати моделювання восьми зондуючих сигналів у контрольних точках 4, 5 схеми лазерного вимірювача відстані (див. рис. 3) з використанням складних сигналів на базі функцій Уолша — Адамара довжиною 8 для випадків відсутності (а, б) та наявності (в, г) активної завади:

а — відгук U_m на виході УЛФ без помилок; б — сигнал U_s на виході порогового пристрою;

в — відгук $U_{m_{3err}}$ на виході УЛФ за наявності 3-кратної помилки;

г — сигнал $U_{s_{err}}$ на виході порогового пристрою за наявності 3-кратної помилки

валості зонduючого сигналу (рис. 6, в), результати вимірювання дальності будуть коректними в разі застосування кодууючої послідовності під номерами 2, 6 та 8, тому що положення імпульсу на виході порогового пристрою співпадає з моментом прийняття сигналу, а його тривалість дорівнює тривалості одного елементу зонduючого сигналу (рис. 6, з).

Результати моделювання підтверджують правомірність зробленого припущення щодо можливості використання логічного узгодженого фільтра з сигналами Уолша на основі матриць Адамара для боротьби з імпульсними завадами, що виникають на вході оптичного приймача лазерного вимірювача дальності.

Алгоритм пошуку найкращих ансамблів збалансованих сигналів

Пропонований нами алгоритм пошуку найкращих з точки зору мінімуму бічних пелюстків АКФ послідовностей представлено на **рис. 7**. Він працює за критерієм обмеженого перебору в класі збалансованих послідовностей з мінімальним рівнем $U_{\text{БП}}$ бічних пелюстків АКФ.

За допомогою цього алгоритму знайдено двадцять послідовностей довжиною $N = 8$, що мають макси-

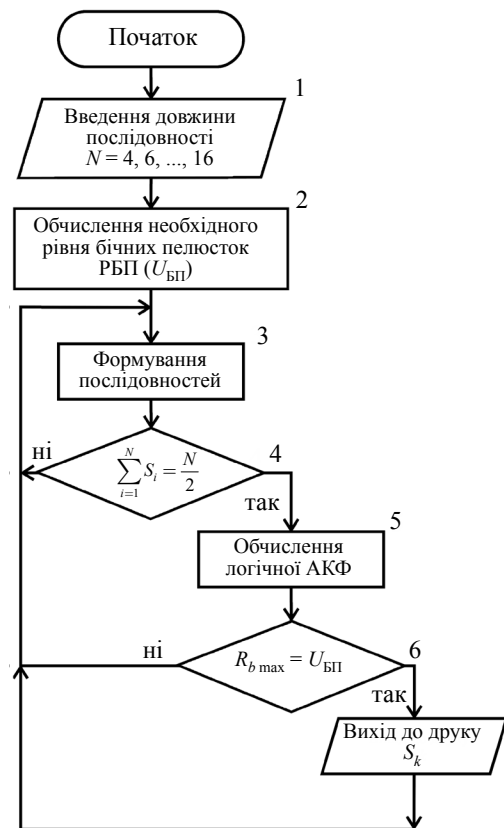


Рис. 7. Алгоритм пошуку найкращих за критерієм мінімуму бічних пелюстків АКФ послідовностей

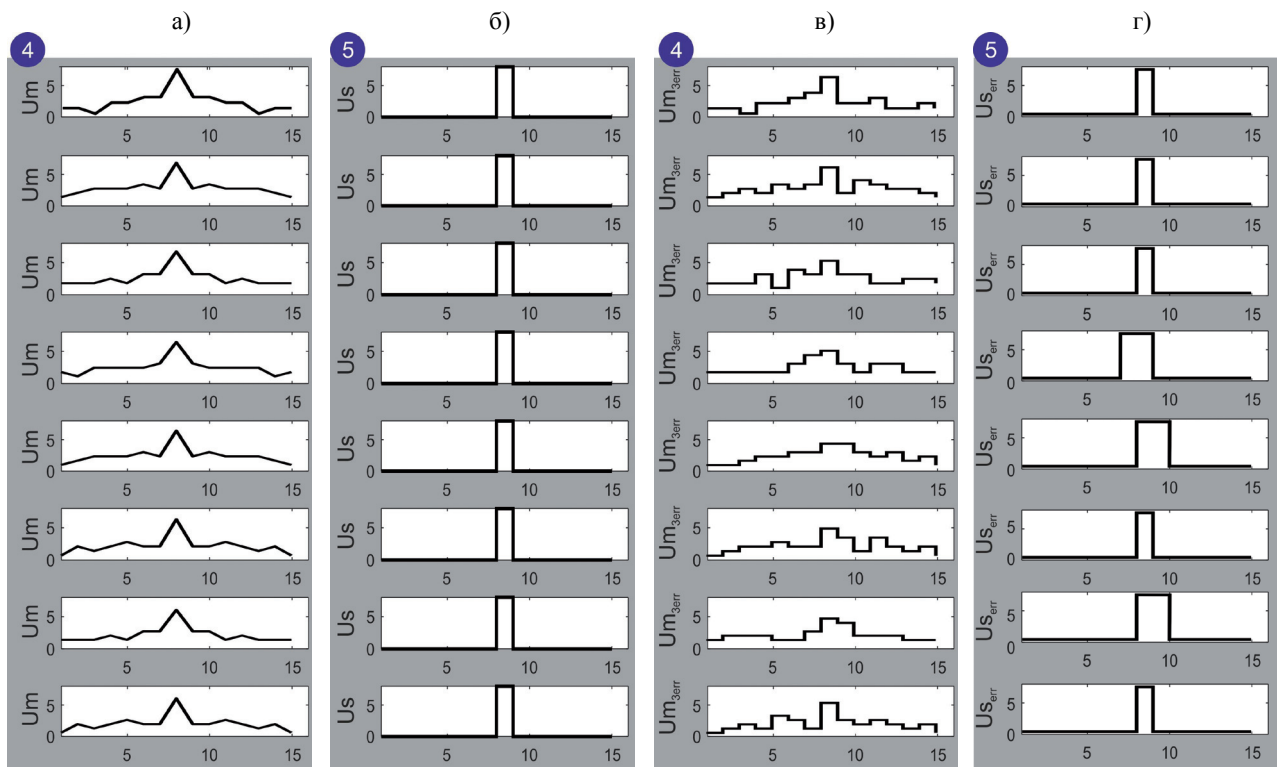


Рис. 8. Результати моделювання восьми зонduючих сигналів, що і на рис. 6, отримані з використанням збалансованих послідовностей довжиною 8

мальний бічний пелюсток $R_{\text{БП}}$ логічної АКФ, що дорівнює 3:

$S1 = \{0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\};$
 $S2 = \{0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\};$
 $S3 = \{0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\};$
 $S4 = \{0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\};$
 $S5 = \{0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\};$
 $S6 = \{0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\};$
 $S7 = \{0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\};$
 $S8 = \{0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\};$
 $S9 = \{0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\};$
 $S10 = \{0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\};$
 $S11 = \{1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\};$
 $S12 = \{1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\};$
 $S13 = \{1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\};$
 $S14 = \{1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\};$
 $S15 = \{1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\};$
 $S16 = \{1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\};$
 $S17 = \{1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\};$
 $S18 = \{1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\};$
 $S19 = \{1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\};$
 $S20 = \{1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\}.$

З двадцяти наведених послідовностей 10 задовольняють і умовам збалансованості, і стартовим вимогам (перший елемент послідовності дорівнює «1»). Також слід зазначити, що жодна з цих 20 послідовностей не є функцією Уолша.

Для коректного порівняння ефективності використання цих послідовностей та послідовностей Уолша виконаємо моделювання роботи далекоміра за аналогічних умов, тобто будемо використовувати 8 сигналів (номера з S11 по S18).

Як можна побачити з **рис. 8**, оптимальні функції мають більшу коректуючу здатність, ніж сигнали на базі функцій Уолша. Кількість помилок, що виправляються, становить $t_{\text{eer}} = 2$, якщо уражені ділянки з логічним рівнем «0». Максимальна кількість уражених елементів, за якої можливе виправлення помилок, дорівнює $t_{\text{eer}} = 6$ за умови, що завада вплине на чотири логічних «1» та два логічних «0». Таким чином, використання оптимальних сигналів, знайдених методом обмеженого перебору, є більш доцільним, ніж за допомогою функцій Уолша.

Висновки

Запропонована схема узгодженого фільтру, що реалізує операцію логічної згортки, враховує особливості обробки сигналу в оптичному діапазоні. При цьому відсутній ефект накопичування енергії завади, а на результат впливає тільки сумарна тривалість дії завади відносно тривалості зондуємого сигналу. Запропонований фільтр є ефективним для обробки сигналів на основі матриць Адамара та оптимальних сигналів, знайдених методом часткового перебору.

Розроблена структурна схема імпульсного лазерного далекоміра забезпечує високу достовірність результатів виміру відстані до рухомої цілі в умовах імпульсних завад.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Фуфаев А.В., Фёдорцев Р.В. Повышение точности измерения дистанции в дальнометрическом канале прибора наблюдения с использованием полупроводникового лазера. *Приборы и методы измерений*, 2013, № 2, с. 95–102.
2. Dudnik A. Investigation of laser rangefinders with sensor network interface. *Technology audit and production reserves*, 2018, no. 4/2(42). <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141190>
3. Вильнер В., Ларюшин А., Рудь Е. Оценка возможностей светолокационного измерителя дальности с накоплением. *Фотоника*, 2007, № 6, с. 22–26.
4. Robinson T.S., Consoli F., Giltrap S. et al. Low-noise time-resolved optical sensing of electromagnetic pulses from petawatt laser-matter interactions. *Scientific Reports*, 2017, no. 7(1), p. 983. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01063-1>
5. Barr K. *Method for improving the received signal to noise ratio of a laser rangefinder*. US Patent 7184130, 2007.
6. Брагинец И.А., Зайцев Е.А., Кононенко А.Г. и др. Повышение помехоустойчивости фазовых лазерных дальнометрических систем. *Техническая электродинамика*. 2014, № 3, с. 91–96.
7. Легкий В. Н., Галун Б. В., Литвиненко С. А. и др. Принципы построения помехоустойчивых миниатюрных лазерных импульсных дальнометров, высотометров и датчиков для бортовых и транспортных систем. *Оптический журнал*, 2011, т. 78, № 5, с. 64–69.
8. Мазурков М.И. *Системы широкополосной радиосвязи*. Одесса, Наука и техника, 2010.

Дата надходження рукопису
до редакції 10.02 2020 р.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.08
УДК 621.382:004.358

А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, Е. К. КОШЕЛЕВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: koa@opu.ua

ПОМЕХОУСТОЙЧИВАЯ СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

Предложена структурная схема лазерного дальнометра с возможностью обнаружения импульсных помех, которые действуют в пределах его дальности, и исправления ошибок, возникающих в структуре отраженного от цели сигнала. Основой схемы дальнометра является логический согласованный фильтр, реализующий операцию логической свертки, структура которого содержит умножители. На основе требований, предъявляемых к кодирующим последовательностям, были найдены оптимальные с точки зрения обеспечения лучшей корректирующей способности структуры бинарных зондирующих сигналов длины 8.

Сравнение корреляционных свойств найденных последовательностей и последовательностей, которые строятся с помощью функций Уолша, показало преимущество оптимальных последовательностей по критерию минимума уровня боковых лепестков АКФ.

Проведенное моделирование работы дальнометра в условиях импульсных помех показало целесообразность использования логического фильтра для тех случаев, когда продолжительность помехи не превышает 1/3 от продолжительности зондирующего сигнала.

Ключевые слова: лазерная дальнометрия, логическая свертка, функции Уолша, бинарные последовательности, логический согласованный фильтр.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.08
UDC 621.382:004.358

A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO, E. K. KOSHELEV

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

E-mail: koa@opu.ua

ANTI-INTERFERENCE PULSED LASER RANGING SYSTEM

Pulsed laser rangefinders prove to be cost-effective and practical devices when used at distances of several tens of kilometers due to their compactness, portability and energy efficiency. However, the measurement accuracy is significantly reduced by the presence of pulsed interference affecting the input of the optical receiver both during the sensing period and when the reflected signal is being received. Using the algorithms with the accumulation and subsequent processing of the results of several successive measurements reduces the speed of decision-making and does not guarantee the convergence of the results to the real value of the distance.

The paper proposes a structural diagram of a laser rangefinder with the ability to detect pulsed interference in the range interval and correct errors that occur in the structure of the signal reflected from the target. The basis of the rangefinder circuit is a logical consistent filter, the structure of which contains multipliers (multiplication operations).

The following requirements were formulated for the structure of the probe signal:

- the first element should always be set to +1 to synchronize the receiver decoder;
- the weight of the coding sequence is equal to half its length;
- the length of the coding sequence is even.

Based on the requirements for coding sequences, the optimal structures of binary probing signals of length 8 were found, providing the best corrective ability.

Comparison of the correlation properties of the found sequences and the sequences that are constructed using the Walsh functions showed the advantage of the optimal sequences by the criterion of the minimum level of the ACF side lobes.

The simulation of the rangefinder under pulsed noise conditions has shown that the logical filter is advisable to use for those cases when the duration of the obstacle does not exceed 1/3 of the duration of the probing signal.

Keywords: laser ranging, logical convolution, Walsh functions, binary sequences, logical matched filter.

REFERENCES

1. Fufaev A. V., Feodortsev R. V. Enhance the accuracy of the distance of distance measuring channel of the observation device using semiconductor laser. *Devices and Methods of Measurements*, 2013, no. 2, pp. 95–102. (Rus)
2. Dudnik A. Investigation of laser rangefinders with sensor network interface. *Technology audit and production reserves*, 2018, no. 4/2(42). <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141190>
3. Wil'ner V., Laryushin A., Rud' Ye. Evaluation of opportunities that have the optical pulse range-finder with accumulation. *Photonics*, 2007, no. 6, pp. 22–26. (Rus)
4. Robinson T.S., Consoli F., Giltrap S. et al. Low-noise time-resolved optical sensing of electromagnetic pulses from petawatt

laser-matter interactions. *Scientific Reports*, 2017, no. 7(1), p. 983. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01063-1>

5. Barr K. *Method for improving the received signal to noise ratio of a laser rangefinder*. US Patent 7184130, 2007.

6. Bragynets I.O., Zaitsev E.O., Kononenko O.G. et al. Increasing the noise immunity of the phase laser ranging systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2014, no. 3, pp. 91–96. (Rus)

7. Legkiy V. N., Galun B. V., Litvinenko S. A. et al. [Principles for the construction of noise-immune miniature laser pulse rangefinders, altimeters and sensors for airborne and transport systems]. *Journal of Optical Technology*, 2011, vol. 78, no. 5, pp. 64–69. (Rus)

8. Mazurkov M.I. *Sistemy shirokopolosnoy radiosvyazi* [Broadband radio systems]. Odessa, Nauka i Tekhnika, 2010, 340 p. (Rus)

Опис статті для цитування:

Садченко А. В., Кушніренко О. А., Кошелєв Є. К. Завадостійка система імпульсної лазерної дальнометрії. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2020, № 1–2, с. 8–14. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.08>

Cite the article as:

Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Koshelev E. K. Anti-interference pulsed laser ranging system. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2020, no. 1–2, pp. 8–14. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.08>

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, к. т. н. А. В. ТРОЯНСКИЙ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: koa@onu.ua

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ СИГНАЛА НА ВХОДЕ ОПТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАЗВЕДКИ

Разработана упрощенная методика, позволяющая определить уровень сигнала на входе чувствительного элемента фотоприемника в идеализированных условиях с учетом требования по реализации минимальной детектируемой мощности оптического сигнала в акустооптическом канале утечки информации при условии отсутствия фоновой засветки фотоприемника.

Ключевые слова: акустооптический канал утечки информации, уровень сигнала, методика расчета, минимальная детектируемая мощность.

Типичная ситуация, связанная с каналами утечки информации выглядит следующим образом: Боб с Алисой обмениваются информацией по открытому каналу связи, а Ева пытается получить доступ к этой информации [1]. Внесем сюда небольшие уточнения: канал коммуникации между Бобом и Алисой — дуплексный акустический (или речевой), а с Евой — однонаправленный оптический. Но сможет ли Ева получить и обработать требуемую информацию? На каком расстоянии?

Перехват речевой информации из помещений [2—7] может осуществляться с помощью технических средств разведки (ТСР). В этом случае применяется дистанционное локационное зондирование объектов, являющихся потенциальными источниками конфиденциальной речевой информации. Такими объектами могут быть оконные стекла и другие виброотражающие поверхности. Чаще всего для технической разведки используются инфракрасный (ИК), невидимый для человеческого глаза диапазон оптического излучения.

Качество канала связи (утечки информации) в большинстве публикаций [8, 9] предлагается оценивать по уровню разборчивости речи (например, не ниже 90%). Такая оценка носит субъективный характер и слабо привязана к техническим характеристикам устройства технической разведки и параметрам канала связи. На практике желательно использовать критерий наличия минимально допустимой мощности на входе приемного устройства информационного сигнала, обеспечивающей выделение сигнала на фоне шума.

В настоящей работе предложена упрощенная методика расчета уровня сигнала на входе приемника технических средств разведки, достаточного для успешного перехвата информации.

Контролируемое помещение представляет собой замкнутый объем, ограниченный стенами и стеклянной поверхностью, средства разведки могут устанавливаться в близлежащих зданиях или машинах, расположенных за его пределами.

Формирование акустооптического технического канала утечки информации происходит при попадании и последующем отражении ИК-излучения на вибрирующее оконное стекло контролируемого помещения. В зависимости от угла падения ИК-луча [10, 11] на вибрирующую поверхность возможны два варианта реализации схемы перехвата информации — с совмещенным и разнесенным приемом (**рис. 1**). Если угол падения близок к нормали, ТСР может быть выполнено по схеме трансивера — приемник и передатчик в одном корпусе (**рис. 1, а**). В противном случае источник подсветки и приемник оптического излучения должны быть установлены в разных местах или помещениях, т. е. необходимо использовать разнесенную схему, когда ТСР представляет собой два отдельных устройства (**рис. 1, б**).

Очевидно, что методика расчета уровня сигнала на входе оптического приемника ТСР не зависит от типа схемы. Расстояние, преодолеваемое лучом от передающей до приемной части, определяется суммированием длины двух участков его траектории, сформированных прямым (не содержащим полезной информации) и отраженным (модулированным) оптическим сигналом.

Структурная схема ИК-канала ТСР представлена на **рис. 2**. Акустические волны, исходящие от источника акустических сигналов и распространяющиеся в воздушной среде, воздействуют на оконное стекло и вызывают его колебания. На это стекло наводится излучение, генерируемое оптическим передатчиком, и та его часть, которая отражается от стекла, модули-

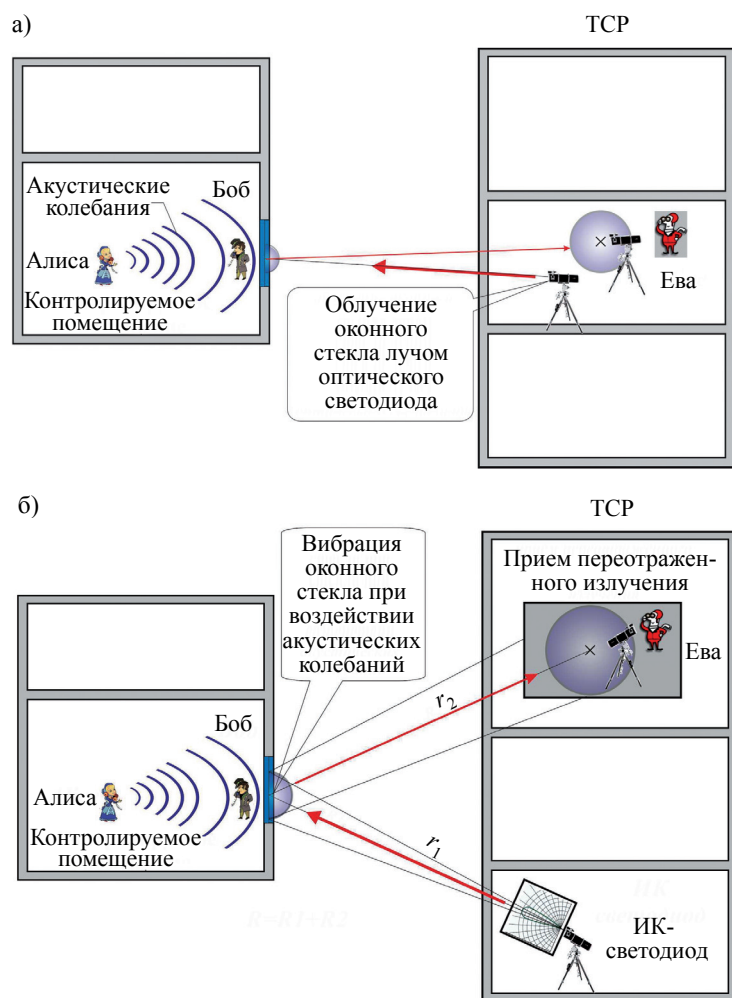


Рис. 1. Схема технического канала утечки информации в случае совмещенного (а) и разнесенного (б) приема

руется по амплитуде и фазе (по закону вибрации поверхности) и фиксируется сверхчувствительным фотоприемником, где осуществляется восстановление сообщения. Регулируемый attenuator $F(\alpha)$ имитирует ослабление отраженного сигнала в зависимости от угла падения ИК-луча.

В табл. 1 приведены значения мощности отраженного от стекла сигнала (как доля энергии падающего луча) в зависимости от угла падения луча на стекло. Таблица составлена для наиболее распространенного стекла с показателем преломления 1,56, для которого предельный угол полного отражения равен 40° (то есть при углах падения более 40° не происходит проникновение энергии сигнала внутрь помещения).

Максимальное расстояние, на котором возможен перехват информации, зависит от мощности отраженного сигнала в точке расположения приемного фотодиода: необходимо, чтобы на входе фотодиода она превышала минимально допустимую мощность (МДМ), т. е. минимальную мощность оптического сигнала, при которой обеспечивается заданное значение отношения сигнал-шум [13]. При дальнейшем рассмотрении будем считать, что это условие выполняется.

Для упрощения анализа предположим следующее:

— мешающая засветка фотоприемника ТСП отсутствует (то есть переговоры осуществляются в безлунную ночь);

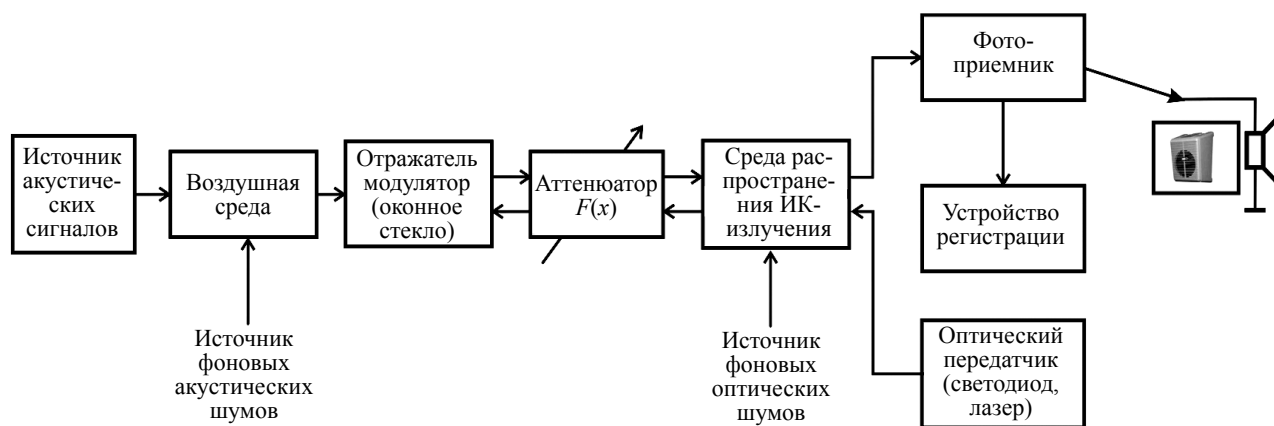


Рис. 2. Структурная схема ТСП для съема акустического сигнала с оконного стекла [12] (формирование канала перехвата информации в ИК-диапазоне)

Таблица 1

Зависимость энергии отраженного сигнала от угла падения луча на стекло

Угол падения, °	0	10	20	30	35	39	39°40'	40	60
Угол преломления, °	0	15°40'	32	51	63	79	82	90	—
Доля отраженной энергии, %	4,7	4,7	5,0	6,8	12	36	47	100	100

— угол отражения от стеклянной поверхности превышает 40° , т. е. доля отраженной энергии близка к 100% (см. табл. 1).

Эквивалентная модель ТСП для расчета уровня сигнала (рис. 3, а) включает в себя выходной излучатель HL_1 передатчика на светодиоде с мощностью излучения P_{HL_1} , ограничивающее ток балластное сопротивление R_6 и входную цепь, которая представлена фотоприемником HL_2 , находящимся в зоне уверенного приема.

Процесс распространения волны от передатчика к приемнику демонстрирует рис. 3, б, где изображено следующее:

— сферический фронт волны, формируемый идеальным изотропным излучателем — сфера радиусом r , равным расстоянию между передатчиком и приемником (ее площадь $S_{сф}$ при расчетах выражается в квадратных градусах);

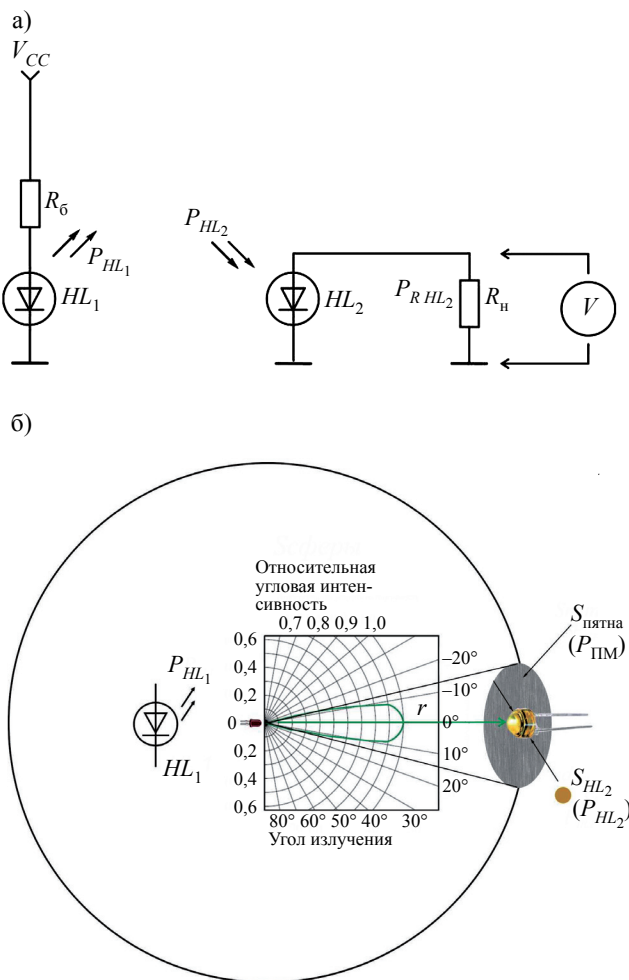


Рис. 3. Эквивалентная модель ТСП (схема выходной цепи излучающего светодиода, ИК-канал, схема входной цепи фотодетектора) (а) и иллюстрация процесса распространения волны от передатчика к приемнику (б):

R_6 — балластное сопротивление; R_n — сопротивление нагрузки на выходе фотодиода; P_{RHL_2} — мощность на нагрузке фотодиода; V_{CC} — напряжение питания

— однолепестковая игольчатая диаграмма направленности, сформированная реальным оптическим излучателем;

— проекция луча направленного излучателя на поверхность сферы — пятно площадью $S_{пятна}$, на котором распределена приходящая мощность $P_{ПМ}$;

— фотодиод HL_2 , на площадь апертуры которого приходится мощность P_{HL_2} (d_{HL_2} , S_{HL_2} — диаметр и площадь апертуры фотодиода соответственно).

Для определения уровня сигнала на входе чувствительного элемента приемника воспользуемся расчетными соотношениями из теории распространения электромагнитных радиоволн, учитывая, что излучение в оптическом диапазоне частот можно рассматривать как электромагнитные волны [14, 15].

Обозначим через P_Σ мощность, излучаемую эквивалентным изотропным излучателем, расположенным в точке передачи. Тогда плотность потока мощности, создаваемая этим излучателем, составит

$$\Pi = \frac{P_\Sigma}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

где r — расстояние до точки наблюдения.

Плотность потока мощности излучения также можно определить через напряженность электрического поля E_m и характеристическое сопротивление свободного пространства (равное 240π Ом):

$$\Pi = 0,5 E_m H_m = \frac{E_m^2}{240\pi}, \quad (2)$$

где E_m , H_m — амплитудные значения векторов напряженности, соответственно, электрического и магнитного полей в свободном пространстве.

Приравняв выражения (1) и (2), для действующего значения напряженности поля получим

$$E = \frac{1}{r} \sqrt{60 P_\Sigma}. \quad (3)$$

Для направленного излучателя (светодиода HL_1) выражения, определяющие мощность полезного сигнала и напряженность поля в месте приема, примут вид

$$P_\Sigma = P_{HL_1} D_0; \quad (4)$$

$$E = \frac{1}{r} \sqrt{60 P_{HL_1} D_0}, \quad (5)$$

где P_{HL_1} — мощность излучения направленного излучателя.

Мощность полезного сигнала (мощность на нагрузке фотодиода), которая рассеивается на сопротивлении нагрузки фотодиода HL_2 , равна

$$P_{RHL_2} = (U_{HL_2})^2 / R_{HL_2}, \quad (6)$$

где U_{HL_2} — уровень наведенного на фотодиоде напряжения.

С другой стороны,

$$P_{HL_2} = P_{\text{ПМ}} \nu, \quad (7)$$

где P_{HL_2} — мощность, выделяемая на апертуре фотодиода;

$P_{\text{ПМ}}$ — мощность в точке приема;

ν — коэффициент использования поверхности раскрыва фотодиода.

Учитывая квантовую эффективность η_{HL_2} фотодиода HL_2 , можем записать

$$P_{RHL_2} = P_{HL_2} \eta_{HL_2},$$

и в таком случае из формулы (6) получим

$$U_{HL_2} = \sqrt{P_{HL_2} \eta_{HL_2} R_{HL_2}}. \quad (8)$$

При распространении электромагнитной волны в среде с характеристическим сопротивлением R , равным 240π Ом (воздух):

$$P_{\text{ПМ}} = \frac{E^2}{R} \Big|_{R=240\pi} = E^2 / 240\pi,$$

и тогда, проводя преобразования при использовании выражения (5), получим

$$P_{\text{ПМ}} = P_{HL_1} \frac{D_0}{4\pi r^2}. \quad (9)$$

В точке расположения фотоприемника (на расстоянии r) светодиод создает пятно радиусом

$$r_1 = r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (10)$$

где α — телесный угол создаваемого луча.

Согласно своему физическому смыслу, коэффициент направленного действия излучателя определяется как площадь $S_{\text{сф}}$ сферы, в центре которой расположен излучатель (как показано на рис. 3, б), выраженная через телесный угол:

$$D_0 = 41253 / \alpha^2,$$

откуда

$$\alpha = \sqrt{41253 / D_0}. \quad (11)$$

Поскольку коэффициент направленного действия D_0 задан в дБ, то есть

$$D_0 \text{ дБ} = 10 \lg D_0,$$

получим

$$D_0 = 10^{\frac{D_0 \text{ дБ}}{10}}. \quad (12)$$

С учетом этого выражение (10) перепишем как

$$r_1 = r \cdot \operatorname{tg} \left(0,5 \sqrt{41253 / D_0} \right). \quad (13)$$

Определим, какая часть мощности приходится на световое пятно, диаметр которого равен диаметру d чувствительного элемента приемника (фотодиода HL_2), т. е. пятно площадью $S_{HL_2} = 4\pi(d/2)^2$.

Коэффициент использования поверхности раскрыва фотодиода рассчитывается как

$$\nu = \frac{4\pi(d/2)^2}{4\pi r_1^2} = \frac{d^2}{4r_1^2}. \quad (14)$$

Из выражений (7) и (14) можем записать

$$P_{HL_2} = P_{\text{ПМ}} \frac{d^2}{4r_1^2},$$

и тогда, учитывая соотношение (9) для $P_{\text{ПМ}}$, а также формулу (13) для r_1 , получим

$$P_{HL_2} = P_{HL_1} \frac{D_0}{4\pi r^2} \frac{d^2}{4 \left[r \cdot \operatorname{tg} \left(0,5 \sqrt{41253 / D_0} \right) \right]^2} =$$

$$= P_{HL_1} \frac{D_0}{16\pi r^4} \frac{d^2}{\operatorname{tg}^2 \left(0,5 \sqrt{41253 / D_0} \right)}. \quad (15)$$

Определим теперь мощность P_{HL_1} излучения передающего ИК-светодиода.

Согласно закону Ома, падение напряжения на светодиоде HL_1 для участка цепи составляет

$$U_{HL_1} = V_{CC} - V_6 = V_{CC} - \frac{V_{CC}}{R_6 + R_{HL_1}} \cdot R_6. \quad (16)$$

Запишем выражение, определяющее взаимосвязь мощности излучаемого сигнала и уровня напряжения на светодиоде HL_1 , учитывая его квантовую эффективность η_{HL_1} :

$$P_{HL_1} = \frac{U_{HL_1}^2}{R_{HL_1}} \cdot \eta_{HL_1} = \frac{\left(V_{CC} - \frac{V_{CC}}{R_6 + R_{HL_1}} \cdot R_6 \right)^2}{R_{HL_1}} \cdot \eta_{HL_1}. \quad (17)$$

С учетом этого можем записать

$$P_{HL_2} = \frac{\left(V_{CC} - \frac{V_{CC}}{R_6 + R_{HL_1}} \cdot R_6 \right)^2}{R_{HL_1}} \cdot \eta_{HL_1} \cdot \frac{D_0}{16\pi r^4} \cdot \frac{d^2}{\operatorname{tg}^2 \left(0,5 \sqrt{41253 / D_0} \right)} =$$

$$= \frac{d^2}{16r^4} \cdot \frac{\left(V_{CC} - \frac{V_{CC}}{R_6 + R_{HL_1}} \cdot R_6 \right)^2}{\operatorname{tg}^2 \left(0,5 \sqrt{41253 / D_0} \right)} \cdot \frac{D_0 \eta_{HL_1}}{\pi R_{HL_1}}.$$

Тогда формула (8) преобразуется к виду

$$U_{HL_2} = \frac{d}{4r^2} \frac{V_{CC} - \frac{V_{CC}}{R_6 + R_{HL_1}} \cdot R_6}{\operatorname{tg} \left(0,5 \sqrt{41253 / D_0} \right)} \sqrt{\frac{D_0 R_{HL_2}}{\pi R_{HL_1}} \eta_{HL_1} \eta_{HL_2}}. \quad (18)$$

Определим уровень сигнала на входе чувствительного элемента приемника (фотодиод HL_2 диаметром $d = 8$ мм с квантовой эффективностью $\eta_{HL_2} = 0,9$), размещенного в зоне перехвата информации на расстоянии $r = 3$ м от передающего модуля (ИК-светодиод HL_1).

Выберем следующие параметры ИК-светодиода HL_1 : $R_6 = 100$ Ом; сопротивление $R_{HL_1} = R_{HL_2} = 10$ Ом; квантовая эффективность $\eta_{HL_1} = 0,75$; коэффициент

Таблица 2

Зависимость напряжения на фотодиоде HL_2 от расстояния до излучающего светодиода HL_1

Расстояние, м	Напряжение на HL_2 , мВ
5	285
10	71
20	18
30	7,92
40	4,45
50	2,85
60	1,98
70	1,45
80	1,11
90	0,88
100	0,71

направленного действия $D_0 = 40$ дБ; напряжение питания $V_{CC} = 15$ В.

Полученные при указанных исходных данных значения напряжения, создаваемого на фотодиоде, в зависимости от расстояния между ним и излучающим светодиодом приведены в **табл. 2**.

Очевидно, что на точность оценки расстояния устойчивого перехвата акустической информации будут влиять следующие факторы:

- характеристики вольтметра, определяющие точность измерения напряжения;
- состояние стеклянной поверхности (например, запыленность стекла);
- текущие характеристики среды распространения излучения (погодных условий).

В связи с этим для реальных условий необходимо ввести такой показатель, как коэффициент запаса мощности отраженного сигнала, определение которого является темой отдельного исследования.

Выводы

Предложенная методика расчета расстояния уверенного приема по критерию минимально допустимой мощности позволяет проводить расчет геометрических размеров зоны перехвата информации при условии, что доля отраженной энергии близка к 100% и отсутствует мешающая засветка фотоприемника технических средств разведки. В отличие от субъективных критериев, таких как, например, уровень разборчивости речи, здесь используется отношение уровня полезного сигнала к уровню шума, приведенного ко входу приемника, т. е. результаты связаны с электрическими и энергетическими параметрами ТСР.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Каторин Ю. Ф., Куренков Е. В., Лысов А. В., Остапенко А. Н. *Большая энциклопедия промышленного шпионажа*, СПб., ООО Полигон, 2000, 896 с.
2. Li X., Yang B., Xie X., Li D., Xu L. Influence of waveform characteristics on LiDAR ranging accuracy and precision. *Sensors*, 2018, vol. 18, iss. 4, p. 1156. <https://doi.org/10.3390/s18041156>
3. Li X., Wang H., Yang B., Huyan J., Xu L. Influence of time-pickoff circuit parameters on LiDAR range precision. *Sensors*, 2017, vol. 17, iss. 10, p. 2369. <https://doi.org/10.3390/s17102369>
4. Хорев А.А. Средства акустической разведки: направленные микрофоны и лазерные акустические системы разведки. *Спецтехника и связь*, 2008, № 2, с. 24–29.
5. Абракітов В.Е. *Багаторазові відбиття звуку в акустичних розрахунках*. Харківська національна академія міського господарства, 2007, 416 с.
6. Каторин Ю.Ф. Оценка возможностей направленных микрофонов при перехвате звуковых сигналов. *Вестник полиции*, 2015, т. 3, № 1, с. 28–33. <https://doi.org/10.13187/VesP.2015.3.28>
7. Дидковский В. С., Дидковская М. В., Продеус А. Н. *Акустическая экспертиза каналов речевой коммуникации*. Киев, Имекс-ЛТД, 2008, 420 с.
8. Соколов, А. И., Монахов М. Ю. *Технические средства защиты информации: технические каналы утечки информации*. Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2006, 71 с.
9. Золотарева К.Н. Лазерный микрофон как техническое средство разведки. *IT: Вчера, Сегодня, Завтра: Материалы III науч.-исслед. конф.*, СПб., Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015, с. 168–169.
10. Глущенко А.В., Глущенко Л.А., Тупота В.И. Математическая модель получения информации об акустическом речевом сигнале по отраженному лазерному излучению. *Сб. докл. 20-й Междунар. конфер. «Лазеры. Измерения. Информация-2010»*. СПб., Изд-во Политехнического ун-та, 2010, т. 1, с. 209–220.
11. Qiu, Q., Lau, D. The Sensitivity of Acoustic-Laser Technique for Detecting the Defects in CFRP-Bonded Concrete Systems. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, vol. 35, art. no. 33. <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0351-y>
12. Ежгуров В.Н., Каторин Ю.Ф., Нырклов А.П., Соколов С.С. Основные принципы построения защищенных информационных систем автоматизированного управления транспортно-логическим комплексом. *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*, 2013, № 2, с. 54–58.
13. Глущенко А. В., Глущенко Л. А., Корзун А. М., Тупота В. И. Оценка эффективности получения информации об акустическом сигнале по отраженному лазерному излучению. *Сб. трудов IX Междунар. конфер. «Прикладная оптика-2010»*. СПб., 2010, с. 71–75.
14. Гришачев В. В., Халяпин Д. Б., Шевченко Н. А., Мерзликин В. Г. Новые каналы утечки конфиденциальной речевой информации через волоконно-оптические подсистемы СКС. *Специальная техника*, 2009, № 2, с. 2–9.
15. Каторин Ю. Ф., Коротков В. В., Нырклов А. П. Защищенность информации в каналах передачи данных в береговых сетях автоматизированной идентификационной системы. *Журнал университета водных коммуникаций*. СПб., СПбГУВ, 2012, № 1, с. 98–102.

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.03 2020 г.

METHOD OF DETERMINING THE SIGNAL LEVEL AT THE INPUT
OF THE OPTICAL RECEIVER OF SURVEILLANCE EQUIPMENT

The paper considers typical designs of surveillance devices for acousto-optic leakage channels. To assess the quality of the channel, it is proposed to use the criterion of the minimum permissible power of the information signal at the input.

To analyze the processes that occur while the probe signal propagates to the pick-up point and back to the surveillance device, the authors propose a detailed model of the information leakage channel with the indication of the main transformations of the intercepted signal. The paper presents the main criteria for the correct reception of an optical signal and for the extraction of acoustic information from it. A number of assumptions are formulated regarding the practical implementation of the optoelectric converter of the receiving device, and a simplified equivalent functional model of the optical information transmission channel is developed.

The authors also propose a method for calculating the voltage at the load of the photodiode depending on the distance to the vibrating surface, power and the coefficient of directional action of the transmitter emitter. The numerical dependences of the voltage at the load of the photodiode on the distance are obtained for specific numerical values of the load resistance, supply voltage, directional coefficient of the emitter and receiver, as well as the geometric dimensions of the information interception zone. A simplified technique is developed that allows determining the signal level at the input of the sensitive element of a photodetector under idealized conditions, if the minimum permissible optical signal power condition is met and there is no background illumination of the photodetector of the surveillance device.

Keywords: acousto-optic leakage channel, signal level, calculation method, minimum detected power.

REFERENCES

1. Katorin Yu. F., Kurenkov Ye. V., Lysov A. V., Ostapenko A. N. *Bol'shaya entsiklopediya promyshlennogo shpionazha* [Great encyclopedia of industrial espionage], Russia, St. Petersburg, Ltd "Poligon", 2000, 896 p. (Rus) <https://doi.org/10.3390/s18041156>
2. Li X., Yang B., Xie X., Li D., Xu L. Influence of waveform characteristics on LiDAR ranging accuracy and precision. *Sensors*, 2018, vol. 18, iss. 4, pp. 1156. <https://doi.org/10.3390/s18041156>
3. Li X., Wang H., Yang B., Huan J., Xu L. Influence of time-pickoff circuit parameters on LiDAR range precision. *Sensors*, 2017, vol. 17, iss. 10, pp. 2369. <https://doi.org/10.3390/s17102369>
4. Khorev A.A. [Means of the acoustic reconnaissance: directional microphones and the laser acoustic systems of reconnaissance]. *Spetsstekhnika i svyaz'*, Moscow, 2008, no. 2, pp. 24–29. (Rus)
5. Abrakotov V.E. *Bagatorazovi vidbytya zvuku v akustichnykh rozrakhunkakh* [Multiple sound reflections in acoustic calculations]. Ukraine, Kharkiv National Academy of Municipal Economy, 2007, 416 p. (Ukr)
6. Katorin Yu.F. [Estimation of the possibilities of directional microphones with the interception of sound signals]. *Vestnik policii*, 2015, vol. 3, iss. 1, pp. 28–33. <https://doi.org/10.13187/VesP.2015.3.28> (Rus)
7. Didkovskiy V. S., Didkovskaya M. V., Prodeus A. N. *Akusticheskaya ekspertiza kanalov rechevoy kommunikatsii* [Acoustic speech communication channel expertise]. Kyiv, Imeks-LTD, 2008, 420 p. (Rus)
8. Sokolov, A. I., Monakhov M. Yu. *Tekhnicheskiye sredstva zashchity informatsii: tekhnicheskiye kanaly utechki informatsii* [Technical means of information protection: technical channels for information leakage]. Russia, Publishing House of Vladimir State University, 2006, 71 p. (Rus)
9. Zolotareva K.N. [Laser microphone as technical equipment for reconnaissance] *Proceedings of the III Conference "IT: Yesterday, today, tomorrow"*, St. Petersburg, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2015, pp. 168–169 (Rus)
10. Glushhenko A.V., Glushhenko L.A., Tupota V.I. *Matematicheskaya model' polucheniya informatsii ob akusticheskom rechevom signale po otrazhennomu lazernomu izlucheniyu.* *Proceedings of the 20-th Int. Conf. "Lasers Measurements. Information 2010"*, vol. 1, St. Petersburg, Politechnical University, 2010, pp. 209–220 (Rus)
11. Qiu, Q., Lau, D. The Sensitivity of Acoustic-Laser Technique for Detecting the Defects in CFRP-Bonded Concrete Systems. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, vol. 35, art. no. 33. <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0351-y>
12. Ezhgurov V.N., Katorin Yu.F., Nyrkov A.P., Sokolov S.S. [The basic principles of building secure information systems for automated management of the transport-logical complex] *Information Security Problems. Computer Systems*, 2013, no. 2, pp. 54–58. (Rus)
13. Glushhenko A. V., Glushhenko L. A., Korzun A. M., Tupota V. I. [Otsenka effektivnosti polucheniya informatsii ob akusticheskom signale po otrazhennomu lazernomu izlucheniyu]. *Proc. of the IX Int. Conf. "Prikladnaya Optika-2010"*, St. Petersburg, 2010, pp. 71–75. (Rus)
14. Grishachev V. V., Haljapin D. B., Shevchenko N. A., Merzlikin V. G. [New channels for leakage of confidential voice information through fiber optic subsystems SCS]. *Specialnaya tekhnika*, 2009, no. 2, pp. 2–9. (Rus)
15. Katorin Ju. F., Korotkov V. V., Nyrkov A. P. [Information security in the channels of data transmission on the waterside networks of automatic identification system]. *Journal of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*, St. Petersburg, 2012, no. 1, pp. 98–102. (Rus)

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ СИГНАЛУ
НА ВХОДІ ОПТИЧНОГО ПРИЙМАЧА
ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ РОЗВІДКИ**

Розглянуто типові схеми побудови пристроїв технічної розвідки в акустооптичних каналах витоку інформації. Для оцінки якості каналу запропоновано спрощену методику, яка використовує критерій наявності мінімальної допустимої потужності інформаційного сигналу на вході приймального пристрою.

Для аналізу процесів, що відбуваються при поширенні зондуючого сигналу до точки знімання і назад до пристрою розвідки, було розглянуто деталізовану модель каналу витоку інформації із зазначенням основних перетворень перехоплюваного сигналу. Сформульовано основні критерії правильного прийому оптичного сигналу та виділення з нього акустичної інформації, а також ряд припущень, що стосуються практичної реалізації опто-електронного перетворювача приймального пристрою і розроблено спрощену еквівалентну функціональну модель оптичного каналу передачі інформації. Запропоновано методику розрахунку напруги на навантаженні фотодіода залежно від відстані до вібруючої поверхні, потужності і коефіцієнта спрямованої дії випромінювача передавача.

Отримані числові залежності напруги на навантаженні фотодіода від відстані за конкретних числових значень опору навантаження, живильної напруги, коефіцієнта спрямованої дії випромінювача і приймача, а також геометричних розмірах зони перехоплення інформації дозволяють за умов реалізації мінімальної допустимої потужності оптичного сигналу та відсутності фонового засвічування фотоприймача технічного засобу розвідки визначити рівень сигналу на вході чутливого елемента фотоприймача в ідеалізованих умовах.

Ключові слова: акустооптичний канал витоку інформації, рівень сигналу, методика розрахунку, мінімальна детектуюча потужність.

Описание статьи для цитирования:

Садченко А. В., Кушнirenко О. А., Троянский А. В. Методика определения уровня сигнала на входе оптического приемника технических средств разведки. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2020, № 1–2, с. 15–21. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.15>

Cite the article as:

Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Troyanskiy A. V. Method of determining the signal level at the input of the optical receiver of surveillance equipment. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature, 2020, no. 1–2, pp. 15–21. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.15>

К. ф.-м. н. А. И. КОНДРИК¹, д. ф.-м. н. Г. П. КОВТУН^{1,2}

Украина, ¹ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины,

²Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ДЕТЕКТОРНЫЕ СВОЙСТВА CdTe:Cl, ОБЛУЧЕННОГО НЕЙТРОНАМИ

Методом компьютерного моделирования исследовано влияние радиационных дефектов, образованных после облучения нейтронами низкой и высокой энергии, на изменение удельного сопротивления, электронной подвижности, времени жизни неравновесных носителей заряда и эффективности сбора зарядов детекторов ионизирующих излучений на основе CdTe:Cl. Установлены механизмы влияния глубоких радиационных дефектов на удельное сопротивление и деградацию детекторных свойств облученного теллурида кадмия, легированного хлором.

Ключевые слова: CdTe:Cl, детекторы, моделирование, облучение нейтронами, дефекты, глубокие уровни, сбор зарядов.

Теллурид кадмия и тройные соединения на его основе считаются одними из лучших полупроводниковых материалов, используемых для регистрации рентгеновского и гамма-излучения [1, 2]. Эти соединения применяются и в некоторых других областях, особенно широко — в неразрушающем анализе, ядерной медицине [3, 4], атомной энергетике и ядерной дозиметрии, а также рассматриваются как перспективные материалы для солнечной энергетики.

Среди основных требований, предъявляемых к материалу полупроводникового детектора ионизирующих излучений, можно выделить необходимость наличия большого значения произведения электронной подвижности μ_n на время жизни неравновесных электронов τ_n , высокого удельного сопротивления ρ и низкой концентрации i -х ловушек неравновесных носителей заряда N_i , что имеет первостепенное значение для достижения высокой эффективности сбора зарядов η . Таким требованиям удовлетворяют CdTe:Cl и CdZnTe.

В процессе эксплуатации в различных условиях эти детекторные материалы могут подвергаться воздействию агрессивной радиационной среды. Ее влияние изучалось в ряде работ на примерах облучения протонами [5, 6], нейтронами [7—10], электронами [11], гамма- [12—14] и рентгеновскими квантами [15, 16], которое приводит к искажениям в спектрах детекторов, изменениям электрофизических свойств, а большие дозы облучений — к полной деградации детекторных свойств. В [5, 10] с помощью нестационарной спектроскопии фотоиндуцированного тока (PICTS) установлено, что при всех типах облучения возникают уровни i -х дефектов, близких по энергии E_i , но имеющих разные концентрации N_i . Заметное влияние на свойства детекторов оказывает облучение нейтронами вследствие их высокой проникающей способности. С увеличением флюенса нейтронов

увеличивается удельное сопротивление [8, 10], а при достижении определенной дозы нейтронного облучения происходит полная деградация эффективности сбора зарядов детекторов на основе CdTe:Cl [9, 10]. Кроме того, в детекторе на основе теллурида кадмия n -типа проводимости может резко уменьшиться электронная подвижность и время жизни неравновесных электронов [8, 17]. Конкретные причины этих явлений остаются до конца непонятыми, поскольку теллурид кадмия детекторного качества обладает высоким удельным сопротивлением (10^9 — 10^{10} Ом·см), что сильно затрудняет экспериментальное исследование его «микроскопических» свойств. Иными словами, с помощью экспериментальных методик очень сложно соотнести «макроскопические» характеристики детекторных материалов с «микроскопическими» эффектами, вызываемыми падающим нейтронным потоком, то есть параметрами дефектных состояний, введенных в кристаллическую решетку. Моделирование же макроскопических характеристик детекторных материалов (μ_n , ρ , η) с использованием таких «микроскопических» параметров, как положение уровней энергии примесей и дефектов в запрещенной зоне E_i , их сечение захвата носителей заряда σ_i и концентрация N_i , позволяет путем сопоставления вычисленных значений с экспериментально измеряемыми «макроевеличинами» понять механизмы изменения электрофизических и детекторных свойств исследуемых полупроводниковых материалов под влиянием агрессивной радиационной среды.

Целью настоящей работы было исследование механизмов влияния радиационных дефектов, возникающих под влиянием нейтронного облучения, на изменение электрофизических свойств CdTe:Cl и величину эффективности сбора зарядов детекторов излучений на основе этого материала.

Теоретическая модель и состав образцов

Исследования проводились методом компьютерного моделирования с использованием в качестве исходных параметров значений N_i , E_i , σ_i , опубликованных в научно-технической литературе.

Для моделирования динамики изменения свойств CdTe:Cl были использованы физическая и математическая модели, подробно описанные и апробированные на достоверность в [18].

Для определения уровня Ферми F и концентрации свободных носителей заряда в приближении параболических зон была применена многоуровневая модель компенсации для произвольного количества примесей и дефектов с построением и численным решением соответствующего уравнения электронейтральности. Электронную подвижность рассчитывали с учетом механизмов рассеяния на ионизированных и нейтральных центрах, акустических фононах, пьезоэлектрических фононах, оптических фононах, а также на неоднородностях легирования. Подвижность дырок полагалась неизменной и равной $70 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Удельное сопротивление рассчитывалось как величина, обратная удельной проводимости, состоящей из электронной и дырочной составляющих. Время жизни неравновесных носителей заряда рассчитывалось согласно модели рекомбинации Шокли — Рида — Холла, а эффективность сбора зарядов детектора определяли по уравнению Хехта [1, с. 489]. Межэлектродное расстояние плоского детектора принималось равным 5 мм, а напряженность электрического поля 1000 В/см .

В таблице представлен типичный исходный состав CdTe:Cl, описанный, например, в [10, 15, 19—21]. Конкретные значения содержания примесей и дефектов и обозначения их уровней энергии взяты из [10]. Методика PICTS, использованная в данной работе для определения состава образца, позволяет точно измерить только энергию дефектов, но не их концентрацию. По этой причине значения N_i , представленные в таблице, были выбраны такими, чтобы они соответствовали величинам, указанным в [19], и обеспечивали необходимые для материала детекторного качества дырочную проводимость и высокое удельное сопротивление — $2 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, измеренное в [10]. Следует отметить, что поскольку в [10] все рассуждения, результаты и выводы носят качественный характер, полученные в настоящей работе модельные зависимости и результаты моделирования также могут быть только качественными.

В таблице приведены значения сечения захвата уровней σ_i , порядок величин которых определен в [22], где одновременно учитывался вклад всех уровней в токи затухания, эмитируемые в соответствующие зоны. Указано также зарядовое состояние дефектов: плюс — для доноров, энергия которых отсчитывается от дна зоны проводимости E_C ; минус — для акцепторов с уровнями, отсчитываемыми от потолка

Исходный состав CdTe:Cl, обладающего удельным сопротивлением $2 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ [10, 19]

Дефект	Параметр		
	E_i , эВ	σ_i , см^2	N_i , см^{-3}
AX^-	0,11	10^{-19}	$2 \cdot 10^{15}$
$A0^-$	0,12	10^{-19}	$5 \cdot 10^{15}$
A^-	0,14	10^{-19}	$5 \cdot 10^{15}$
$A1^-$	0,16	$2 \cdot 10^{-19}$	$5 \cdot 10^{14}$
X^-	0,29	10^{-18}	$5 \cdot 10^{14}$
DX^{2-}	0,41	10^{-17}	$5 \cdot 10^{15}$
Z^+	0,47	10^{-16}	$1 \cdot 10^{15}$
Y^-	0,67	10^{-18}	$3 \cdot 10^{15}$
W^-	0,70	10^{-18}	$3 \cdot 10^{15}$
H^-	0,77	10^{-18}	$5 \cdot 10^{15}$
HI^+	0,82	10^{-18}	$7 \cdot 10^{15}$
I^+	1,0	10^{-16}	$1 \cdot 10^{16}$

валентной зоны E_V . Поведение представленных дефектов в процессе нейтронного облучения обсуждается в [10], однако там не рассматривается их физическая природа, хотя в настоящее время уже известно, что мелкие акцепторы AX , $A0$, A , $A1$ — это комплексы вакансий кадмия с различными фоновыми примесями и хлором. Принадлежность некоторых глубоких уровней к разным дефектам будет обсуждаться ниже.

Кроме приведенных в таблице дефектов, в материале присутствует также примесь хлора, которая вводится в матрицу как примесь замещения на месте теллура Cl_{Te} и выступает в роли донора, предназначенного для компенсации мелких акцепторов (AX , $A0$, A , $A1$, X) и достижения высокоомного состояния CdTe:Cl, необходимого для детекторов. Энергия активации Cl_{Te} относительно края зоны проводимости E_C составляет 0,014 эВ при низкой, около 10 К, температуре. При комнатной температуре — рабочей температуре детектора — уровень энергии Cl_{Te} переходит в зону проводимости. С повышением температуры от 10 до 300 К величина запрещенной зоны CdTe уменьшается примерно на 0,1 эВ.

Результаты и их обсуждение

В [10] исследуемый материал CdTe:Cl облучали потоками низкоэнергетических нейтронов ($\approx 10 \text{ эВ}$) с флюенсами от 10^{10} до 10^{14} см^{-2} и высокоэнергетических нейтронов ($\approx 500 \text{ кэВ}$) с флюенсами J от 10^{11} до 10^{13} см^{-2} с шагом величины потока один порядок. Радиационные донорные дефекты Z в теллуриде кадмия возникают уже на первой стадии облучения и да-

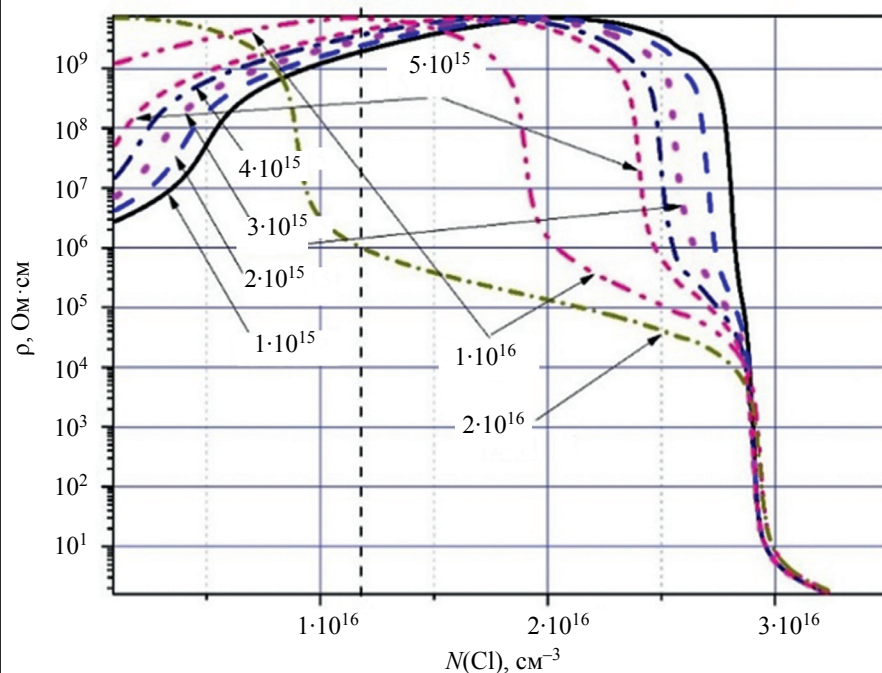


Рис. 1. Зависимости удельного сопротивления CdTe:Cl от концентрации легирующего хлора, полученные при комнатной температуре для различных значений концентрации радиационных донорных дефектов Z (в см^{-3}) (вертикальная пунктирная линия соответствует исследуемому образцу)

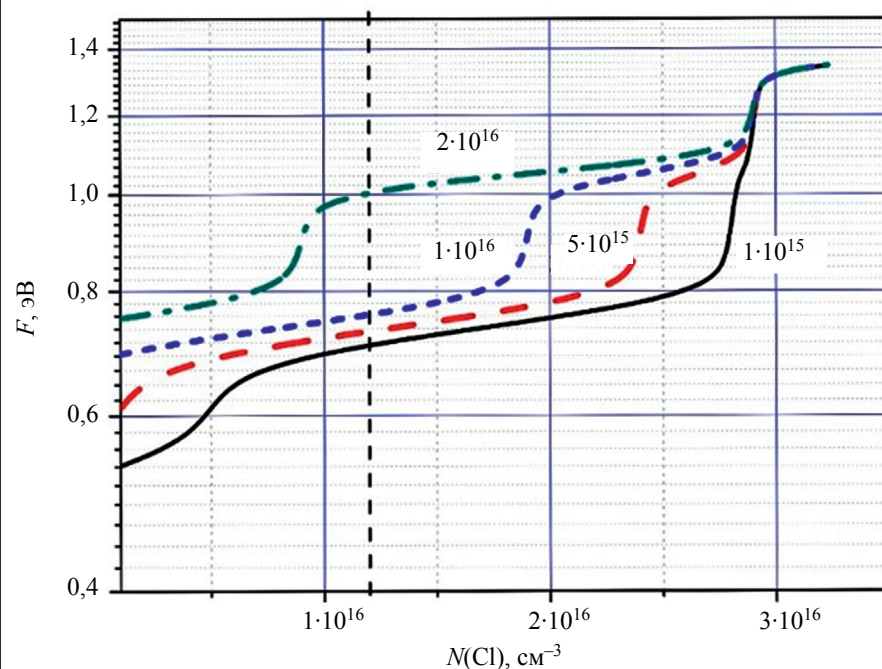


Рис. 2. Зависимости уровня Ферми, отсчитываемого от потолка валентной зоны E_v , от содержания хлора для различных значений концентрации радиационных донорных дефектов Z (в см^{-3}) (вертикальная пунктирная линия соответствует исследуемому образцу)

более присутствуют на всех стадиях, причем в момент полной деградации регистрирующих свойств детектора амплитуда импульса от этих дефектов в спектре максимальна. При этом удельное сопротивление возрастает на 50% после низкоэнергетического облучения и примерно на порядок после облучения высоко-

сом 10^{13} см^{-2} , а удельное сопротивление возрастало скачкообразно примерно до $1,5 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при комнатной температуре. Однако моделирование показало, что максимально возможное удельное сопротивление исследуемого CdTe:Cl при комнатной температуре не может превышать $6,9 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, когда уровень Ферми

энергетическими нейтронами. В связи с этим представляло интерес смоделировать динамику изменения удельного сопротивления при увеличении концентрации радиационных донорных дефектов, которые вызывают резкое уменьшение эффективности сбора зарядов и полную деградацию детекторных свойств.

На рис. 1 показан результат моделирования зависимости удельного сопротивления ρ для CdTe:Cl от концентрации легирующей примеси хлора при разном содержании дефектов Z — от $1 \cdot 10^{15}$ до $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Вычисления показали, что $\rho = 2 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при концентрациях $N(Z) = 0$ и $N(Z) = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, как и было измерено экспериментально для необлученного материала в [10], и это состояние принято в качестве исходного.

Для исследуемого образца путем сравнения приращения $\Delta\rho$, измеренного после каждой стадии облучения [10, рис. 3], можно поставить в приблизительное соответствие определенную концентрацию дефектов Z , полученную из модельных результатов, часть из которых приведена на рис. 1.

После облучения низкоэнергетическими нейтронами флюенсом $J = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ $\Delta\rho = 30\%$, что соответствует $N(Z) \approx 2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; при $J = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ $\Delta\rho = 40\%$ и $N(Z) \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При этом в эксперименте наблюдалась частичная деградация эффективности сбора зарядов.

В случае облучения высокоэнергетическими нейтронами полная деградация эффективности сбора зарядов наблюдалась после облучения флюен-

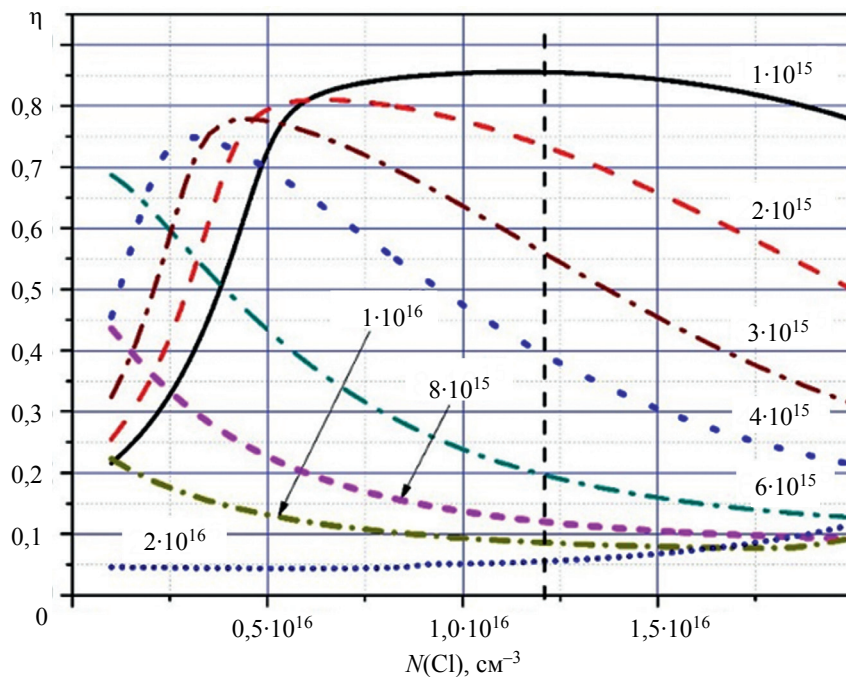


Рис. 3. Зависимости эффективности сбора зарядов детектора на основе CdTe:Cl от содержания легирующего хлора для различных значений концентрации радиационных донорных дефектов Z (в см^{-3})

(вертикальная пунктирная линия соответствует исследуемому образцу)

находится примерно в середине запрещенной зоны, а концентрация радиационных дефектов достигает примерно $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2). При дальнейшем увеличении $N(Z)$ уровень Ферми смещается ближе к зоне проводимости, в окрестность уровня Z , удельное сопротивление уменьшается и при $N(Z) \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ составляет $10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (см. рис. 1), а проводимость становится электронной.

Таким образом, наблюдаемый в эксперименте [10] резкий скачок ρ после облучения CdTe:Cl высокоэнергетическими нейтронами флюенсом 10^{13} см^{-2} можно объяснить не влиянием радиационных глубоких уровней на уровень Ферми, а перестройкой кристаллической структуры теллурида кадмия с изменением постоянной решетки и увеличением ширины запрещенной зоны, сопровождающемся резким изменением параметров проводимости.

Моделирование показало также, что при увеличении содержания радиационных донорных дефектов заметно падает эффективность сбора зарядов η , т. е. происходит полная деградация регистрирующих свойств детектора, что демонстрируется кривыми с $N(Z) = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $N(Z) = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на рис. 3 и качественно подтверждается результатами эксперимента, описанного в [10]. Концентрации $N(Z) = (1-2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на рис. 3 приблизительно соответствуют значению $N(Z)$, полученному после облучения высокоэнергетическими нейтронами флюенсом 10^{13} см^{-2} , а $N(Z) = (1-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ — низкоэнергетическими нейтронами флюенсами от 10^{11} до 10^{12} см^{-2} . Из рис. 3 также можно увидеть, что в случае $N(Z) = (1-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ происходит частичная по-

теря регистрирующих свойств детектора на основе CdTe:Cl, что качественно соответствует результатам эксперимента [10].

Таким образом, качественное соответствие результатов моделирования с экспериментом позволяет объяснить причины изменения удельного сопротивления и полной деградации эффективности сбора зарядов детектора на основе CdTe:Cl после нейтронного облучения. Повышение удельного сопротивления ρ в процессе облучения низкоэнергетическими нейтронами ($\approx 10 \text{ эВ}$) вызвано заметным увеличением концентрации глубоких доноров Z с уровнем энергии примерно 1 эВ относительно края E_V валентной зоны, который увлекает уровень Ферми в середину запрещенной зоны, где он закрепляется в окрестности уровней H , $H1$. Эти уровни оказывают стабилизирующее влия-

ние на величину ρ на начальных стадиях облучения. Наблюдаемый резкий скачок ρ после облучения высокоэнергетическими нейтронами ($\approx 500 \text{ кэВ}$) флюенсом 10^{13} см^{-2} можно объяснить перестройкой кристаллической структуры теллурида кадмия.

Деградация регистрирующих свойств детектора в процессе облучения низкоэнергетическими нейтронами, а также на начальных стадиях облучения высокоэнергетическими нейтронами происходит в основном из-за захвата неравновесных носителей заряда глубокими донорными дефектами Z , $H1$, I и глубоким акцептором H (см. таблицу), а также по причине рекомбинации носителей заряда на них. Моделирование показало, что такая деградация происходит главным образом благодаря заметному (в несколько десятков раз) уменьшению времени жизни неравновесных электронов. Точно указать причину полной деградации эффективности сбора зарядов детектора после облучения высокоэнергетическими нейтронами ($E \approx 500 \text{ кэВ}$, $J = 10^{13} \text{ см}^{-2}$) пока что не представляется возможным, поскольку остаются неизвестными микроскопические параметры CdTe:Cl после такой нейтронной обработки.

В настоящее время нет однозначной интерпретации физической природы вышеуказанных глубоких уровней, однако проведенный анализ научно-технических публикаций показал, что дефект Z^- можно связать с межузельным теллуром, $H1^+$ — с теллуром на месте кадмия, I^+ — с вакансией теллура. Природа глубокого акцептора H^- пока что не выяснена, возможно, тут есть связь с вакансией кадмия, хотя по мнению большинства исследователей энергия активации вакансии

кадмия должна быть ниже уровня H^- относительно потолка валентной зоны E_V .

Электронная подвижность μ_n играет важную роль в сборе зарядов детектора, и существенное снижение μ_n может серьезно ухудшить его регистрирующую способность. Представляло интерес исследовать характер изменения μ_n в зависимости от содержания глубоких дефектов, оказывающих заметное влияние на детекторные свойства, и особенно от концентрации дефекта Z , вызывающего полную деградацию детектора.

На рис. 4 представлена трехмерная зависимость изменения подвижности электронов μ_n от содержания глубокого донора Z и глубокого акцептора H . При моделировании предполагалось, что дефекты Z и H распределены равномерно по объему кристалла.

Анализируя рис. 4, можно отметить два основных момента. Во-первых, вычисленная подвижность электронов μ_n близка к величине 1100 — 1200 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, хорошо известной из многих экспериментов. Во-вторых, изменение на порядок концентрации равномерно распределенных по кристаллу дефектов, сильно влияющих на детекторные свойства, не оказывает заметного влияния на μ_n , которая изменяется незначительно — в пределах 1% по абсолютной величине.

Наблюдающееся в некоторых экспериментах резкое уменьшение электронной подвижности в CdTe:Cl может быть вызвано влиянием скопления дефектов, образованных под воздействием нейтронной бомбардировки, на рассеяние электронов проводимости. Для проверки этого предположения было проведено моделирование в соответствии с [18, с. 45], которое позволило оценить влияние областей скопления дефектов на μ_n в теллуриде кадмия.

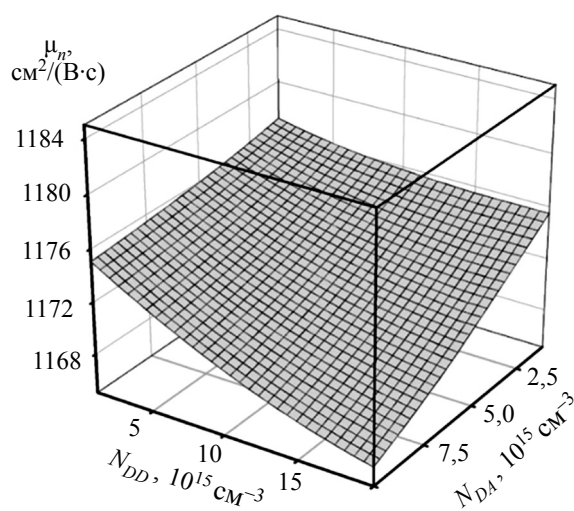


Рис. 4. Изменение электронной подвижности в зависимости от концентрации глубокого донора (N_{DD}) и глубокого акцептора (N_{DA})

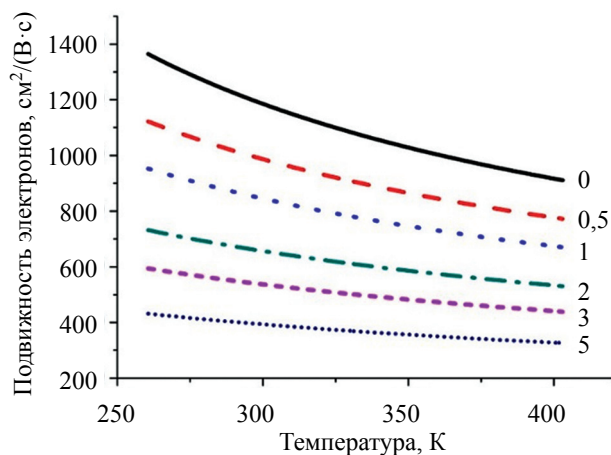


Рис. 5. Температурные зависимости подвижности электронов в CdTe:Cl для разных значений концентрации кластеров (ед. изм. 10^{11} см^{-3}) дефектов с поперечным сечением $2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$

На рис. 5 показаны результаты расчета, которые проводились в предположении рассеяния электронов проводимости на микроскопических скоплениях дефектов, обладающих определенным сечением, без учета искажений и поляризации решетки. Здесь видно, что концентрация кластеров дефектов существенно влияет на подвижность электронов: чем она больше, тем подвижность меньше. Уменьшение μ_n , а также резкое снижение времени жизни неравновесных электронов τ_n (из-за захвата и рекомбинации на радиационных уровнях) может привести к сильному снижению произведения $\mu_n \tau_n$ и полной деградации детекторных свойств. Ранее, в [18], было установлено, что аналогичное влияние на электронную подвижность оказывают примесные кластеры в $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$.

Выводы

Повышение удельного сопротивления CdTe:Cl при его бомбардировке низкоэнергетическими нейтронами и на начальных стадиях бомбардировки высокоэнергетическими нейтронами вызвано увеличением концентрации радиационных донорных дефектов Z (уровень энергии $E_C = 0,47 \text{ эВ}$), предположительно межузельного теллура, который смещает уровень Ферми в середину запрещенной зоны. Резкий скачок ρ , который наблюдается при бомбардировке высокоэнергетическими нейтронами флюенсом 10^{13} см^{-2} , вызван перестройкой кристаллической структуры детекторного материала с изменением постоянной решетки и, возможно, увеличением ширины запрещенной зоны, сопровождающимся резким изменением свойств проводимости.

Деградация детекторных свойств CdTe:Cl при облучении нейтронами происходит вследствие захвата и рекомбинации неравновесных электронов на радиационных глубоких донорных дефектах — межузельном Te , на теллуре на месте кадмия, на вакан-

сиях теллура, а также на глубоких акцепторах — вакансиях кадмия.

Если при нейтронном облучении CdTe:Cl происходит деградация электронной подвижности, то это может быть вызвано рассеянием электронов на областях скопления радиационных структурных дефектов. При равномерном распределении дефектов по объему кристалла увеличение их концентрации вплоть до 10^{16} см^{-3} не влияет существенно образом на электронную подвижность при комнатной температуре.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Knoll G. F. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.
2. Csaba Szeles. CdZnTe and CdTe materials for X-ray and gamma ray radiation detector applications. *Physica Status Solidi (b)*, 2004, vol. 241, iss. 3, pp. 783–790. <http://dx.doi.org/10.1002/pssb.200304296>
3. Jambi L.K., Lees J.E., Bugby S. et al. Evaluation of XRI-UNO CdTe detector for nuclear medical imaging. *Journal of Instrumentation*, 2015, no. 10, P06012. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/10/06/P06012>
4. Samira Abbaspour, Babak Mahmoudian, Jalil Pirayesh Islamian. Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. *World J. Nucl. Medicine*, 2017, no. 16 (2), pp. 101–107. <http://dx.doi.org/10.4103/1450-1147.203079>
5. Fraboni B., Cavallini A., Auricchio N., Bianconi M. Deep traps induced by 700 keV protons in CdTe and CdZnTe detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, vol. 54, iss. 4, pp. 828–833. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2007.902364>
6. Lamb D.A., Underwood C. I., Barriozet V. al. Proton irradiation of CdTe thin film photovoltaics deposited on cerium-doped space glass. *Progress in Photovoltaics*, 2017, vol. 25, iss. 12, pp. 10059–1067. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2923>
7. Xianf Chen, He-tong Han, Gang Li, Yi Lu. Accumulative dose response of CdZnTe detectors to 14.1 MeV neutrons. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. Sec. B*, 2017, vol. 394, pp. 97–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2017.01.001>
8. Пляцко С. В., Рашковецкий Л. В. Глубокие центры радиационных дефектов в монокристаллах CdZnTe, созданные потоком быстрых нейтронов. *Физика и техника полупроводников*, 2018, т. 52, вып. 3, с. 322–326. <http://dx.doi.org/10.21883/FTP.2018.03.45615.8373>
9. Miyamaru H., Fujii K., Iida T., Takahashi A. Effect of fast neutron irradiation on CdTe radiation detectors. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1997, vol. 34, no. 8, pp. 755–759. <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.1997.9733739>
10. Cavallini A., Fraboni B. Defective states induced in CdTe and CdZnTe detectors by high and low energy neutron irradiation. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, no. 5, pp. 3135–3142. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1600529>
11. Loginov Yu. Yu., Mozzherin A. V., Paklin N. N. Modeling structural defect formation in cadmium telluride during electron irradiation. *21st Int. Scientific Conference Reshetnev Readings-2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 467, pp. 012007. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/467/1/012007>
12. Кондрик А. И. Детекторные свойства $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}:\text{Al}$ под влиянием γ -облучения малой дозы. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2016, № 1, с. 12–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.1.12>
13. Karunathan R., Mohanraj K., Chandrasekaran J., Babu B. Effect of gamma irradiation on structural properties of CdTe thin films. *Chemical Letters*, 2018, vol. 1, iss. 1, pp. 19–22. <http://dx.doi.org/10.26524/cl1814>
14. Kumar S., Kumar M. V., Pattabi M. et al. Effect of gamma irradiation on electrical properties of CdTe/CdS solar cells. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 10, part 3, pp. 22570–22575. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.630>
15. Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A. et al. X-ray irradiation effects on the trapping properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ detectors. *J. Appl. Phys.* 2009, vol. 106, pp. 093713. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3253748>
16. Dreier Erik Schou, Kehres Jan, Khalil Mohamad et al. Spectral correction algorithm for multispectral CdTe X-ray detectors. *Optical Engineering*, 2018, vol. 57, no. 5, pp. 054117–1–054117-13. <http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.57.5.054117>
17. Miyamaru H., Iida T., Takahashi A. Improvement of radiation response characteristic on CdTe detectors using fast neutron irradiation. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1999, vol. 36, iss. 1, pp. 54–60. <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.1999.9726181>
18. Кондрик А. И., Ковтун Г. П. Влияние примесей и структурных дефектов на электрофизические и детекторные свойства CdTe и CdZnTe. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 5–6, с. 43–50. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43>
19. Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 1996, vol. 380, iss. 1–2, pp. 117–120. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00287-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2)
20. Fraboni B., Cavallini A., Dusi W. Damage induced by ionizing radiation on CdZnTe and CdTe detectors. *Nuclear Science, IEEE Transactions*, 2004, vol. 51, iss. 3, pp. 1209–1215. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2004.829445>
21. Ruihua Nan, Tao Wang, Gang Xu et al. Compensation processes in high-resistivity $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ crystals doped with In/Al. *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 451, pp. 150–154. <http://dx.doi.org/10.1088/1674-4926/30/8/082002>
22. Nan Rui-hua, Jie Wan-qil, Zha Gang-qiang et al. Determination of trap levels in CZT:In by thermally stimulated current spectroscopy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, vol. 22, pp. s148–s152. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61700-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61700-2)

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.02 2020 г.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.22
UDC 621.315.592.3

О. І. КОНДРИК¹, Г. П. КОВТУН^{1,2}

Україна, м. Харків, ¹ННЦ «ХФТІ» НАН України,

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ВПЛИВ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА ДЕТЕКТОРНІ ВЛАСТИВОСТІ CdTe:Cl, ОПРОМІНЕНОГО НЕЙТРОНАМИ

Перспективним матеріалом для напівпровідникових детекторів іонізуючих випромінювань є CdTe:Cl, який дозволяє одержувати детектори з великими питомим опором ρ та електронною рухливістю μ_n . В процесі експлуатації детекторні матеріали можуть піддаватися впливу нейтронного опромінення, в результаті чого в кристалічній решітці виникають радіаційні дефекти, а в забороненій зоні з'являються глибокі рівні, які діють як центри захоплення та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду, знижуючи реєстраційну здатність детектора.

Метою даної роботи було дослідження методом комп'ютерного моделювання механізмів впливу радіаційних дефектів, що виникають під дією нейтронного опромінення, на електрофізичні властивості (ρ , μ_n) CdTe:Cl та ефективність збору зарядів η детекторів випромінювань на основі цього матеріалу.

Моделювання проводилось на основі апробованих на достовірність моделей. Було встановлено, що підвищення питомого опору ρ CdTe:Cl при його бомбардуванні низькоенергетичними нейтронами і на початкових стадіях бомбардування високоенергетичними нейтронами викликано збільшенням концентрації радіаційних донорних дефектів Z (з рівнем енергії $E_C - 0.47$ eV), ймовірно міжвузельного телуру, який зміщує рівень Фермі в середину забороненої зони. Різкий стрибок ρ , який спостерігається при бомбардуванні високоенергетичними нейтронами, ймовірно викликаний перебудовою кристалічної структури детекторного матеріалу зі зміною постійної решітки та збільшенням ширини забороненої зони, що супроводжуються зміною властивостей провідності. Деградація детекторних властивостей CdTe:Cl при опроміненні нейтронами відбувається внаслідок захоплення і рекомбінації нерівноважних електронів на радіаційних дефектах: на міжвузельному Te, на телурі на місці кадмію, на вакансіях телуру та вакансіях кадмію. Деградація електронної рухливості може бути викликана розсіюванням електронів на мікроскопічних областях скупчень радіаційних дефектів. При рівномірному розподілі дефектів по об'єму кристала підвищення їхньої концентрації аж до 10^{16} см⁻³ істотно не впливає на електронну рухливість за кімнатної температури.

Ключові слова: CdTe:Cl, детектори, моделювання, опромінення нейтронами, дефекти, глибокі рівні, збір зарядів.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.22
UDC 621.315.592.3

A. I. KONDRUK¹, G. P. KOVTUN^{1,2}

Ukraine, Kharkiv, ¹NSC «Kharkiv Institute of Physics and Technology»,

²V. N. Karazin Kharkiv National University

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

INFLUENCE OF RADIATION DEFECTS ON THE ELECTROPHYSICAL AND DETECTOR PROPERTIES OF CdTe:Cl IRRADIATED BY NEUTRONS

A promising material for semiconductor detectors of ionizing radiation is CdTe:Cl which allows obtaining detectors with high resistivity ρ and electron mobility μ_n . During operation, the detector materials may be exposed to neutron irradiation, which causes radiation defects to form in crystal lattice and deep levels to appear in the band gap, acting as centers of capture and recombination of nonequilibrium charge carriers, thus reducing the detection capability. The aim of this study was to use computer simulation to investigate the mechanisms of the influence of such radiation defects on the electrophysical properties (ρ , μ_n) of CdTe:Cl and the charge collection efficiency η of radiation detectors based on this material.

The simulations were based on the models tested for reliability. It was found that the increase of the CdTe:Cl resistivity ρ during low-energy neutrons bombardment and at the initial stages of high-energy neutrons bombardment is caused by an increase in the concentration of radiation donor defect Z (with an energy level $E_C - 0.47$ eV), presumably interstitial tellurium, which shifts the Fermi level into the middle of the band gap. The sharp rise of ρ observed at high-energy neutron bombardment is probably caused by the restructuring of the crystalline structure of the detector material with a change in the lattice constant and with an increase of the band gap, accompanied by a change in the conductivity properties. The degradation of the detector properties of CdTe:Cl during neutron irradiation is due to the capture and recombination of nonequilibrium electrons at

radiation defects: Te interstitial, Te substitutional at the cadmium site, on tellurium vacancies and cadmium vacancies. The degradation of electron mobility μ_n can be caused by the scattering of electrons at microscopic areas of radiation defect clusters. The increase in concentration of the defects over the volume of the crystal at their uniform distribution of up to 10^{16} cm^{-3} does not significantly affect the electron mobility at room temperature.

Keywords: CdTe:Cl, detectors, modeling, neutron irradiation, defects, deep levels, charge collection.

REFERENCES

- Knoll G. F. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.
- Csaba Szeles. CdZnTe and CdTe materials for X-ray and gamma ray radiation detector applications. *Physica Status Solidi (b)*, 2004, vol. 241, iss. 3, pp. 783–790. <http://dx.doi.org/10.1002/pssb.200304296>
- Jambi L. K., Lees J. E., Bugby S. et al. Evaluation of XRI-UNO CdTe detector for nuclear medical imaging. *Journal of Instrumentation*, 2015, no. 10, P06012. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/10/06/P06012>
- Samira Abbaspour, Babak Mahmoudian, Jalil Pirayesh Islamian. Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. *World J. Nucl. Medicine*, 2017, no. 16 (2), pp. 101–107. <http://dx.doi.org/10.4103/1450-1147.203079>
- Fraboni B., Cavallini A., Auricchio N., Bianconi M. Deep traps induced by 700 keV protons in CdTe and CdZnTe detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, vol. 54, iss. 4, pp. 828–833. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2007.902364>
- Lamb D. A., Underwood C. I., Barriozet V. al. Proton irradiation of CdTe thin film photovoltaics deposited on cerium-doped space glass. *Progress in Photovoltaics*, 2017, vol. 25, iss. 12, pp. 10059–1067. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2923>
- Xianf Chen, He-tong Han, Gang Li, Yi Lu. Accumulative dose response of CdZnTe detectors to 14.1 MeV neutrons. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. Sec. B*, 2017, vol. 394, pp. 97–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2017.01.001>
- Plyatsko S. V., Rashkovetskiy L. V. [Deep centers of radiation defects in CdZnTe single crystals created by a fast neutron flux]. *Semiconductors/Physics of the Solid State*, 2018, vol. 52, iss. 3, pp. 322–326. <http://dx.doi.org/10.21883/FTP.2018.03.45615.8373> (Rus)
- Miyamaru H., Fujii K., Iida T., Takahashi A. Effect of fast neutron irradiation on CdTe radiation detectors. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1997, vol. 34, no. 8, pp. 755–759. <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.1997.9733739>
- Cavallini A., Fraboni B. Defective states induced in CdTe and CdZnTe detectors by high and low energy neutron irradiation. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, no. 5, pp. 3135–3142. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1600529>
- Loginov Yu. Yu., Mozherin A. V., Paklin N. N. Modeling structural defect formation in cadmium telluride during electron irradiation. *21st Int. Scientific Conference Reshetnev Readings-2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 467, pp. 012007. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/467/1/012007>
- Kondrik A. I. Detector properties of $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te:Al}$ under the influence of low dose gamma irradiation. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 1, pp. 12–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.1.12> (Rus)
- Karunathan R., Mohanraj K., Chandrasekaran J., Babu B. Effect of gamma irradiation on structural properties of CdTe thin films. *Chemical Letters*, 2018, vol. 1, iss. 1, pp. 19–22. <http://dx.doi.org/10.26524/cl1814>
- Kumar S., Kumar M. V., Pattabi M. et al. Effect of gamma irradiation on electrical properties of CdTe/CdS solar cells. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 10, part 3, pp. 22570–22575. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.630>
- Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A. et al. X-ray irradiation effects on the trapping properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ detectors. *J. Appl. Phys.* 2009, vol. 106, pp. 093713. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3253748>
- Dreier Erik Schou, Kehres Jan, Khalil Mohamad et al. Spectral correction algorithm for multispectral CdTe X-ray detectors. *Optical Engineering*, 2018, vol. 57, no. 5, pp. 054117–1–054117-13. <http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.57.5.054117>
- Miyamaru H., Iida T., Takahashi A. Improvement of radiation response characteristic on CdTe detectors using fast neutron irradiation. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1999, vol. 36, iss. 1, pp. 54–60. <http://dx.doi.org/10.1080/18811248.1999.9726181>
- Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of impurities and structural defects on electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnTe. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 5–6, pp. 43–50. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43> (Rus)
- Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 1996, vol. 380, iss. 1–2, pp. 117–120. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00287-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2)
- Fraboni B., Cavallini A., Dusi W. Damage induced by ionizing radiation on CdZnTe and CdTe detectors. *Nuclear Science, IEEE Transactions*, 2004, vol. 51, iss. 3, pp. 1209–1215. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2004.829445>
- Ruihua Nan, Tao Wang, Gang Xu et al. Compensation processes in high-resistivity $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ crystals doped with In/Al. *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 451, pp. 150–154. <http://dx.doi.org/10.1088/1674-4926/30/8/082002>
- Nan Rui-hua1, Jie Wan-qil, Zha Gang-qiang et al. Determination of trap levels in CZT:In by thermally stimulated current spectroscopy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, vol. 22, pp. s148–s152. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61700-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61700-2)

Описание статьи для цитирования:

Кондрик А. И., Ковтун Г. П. Влияние радиационных дефектов на электрофизические и детекторные свойства CdTe:Cl, облученного нейтронами. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 1–2, с. 22–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.22>

Cite the article as:

Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of radiation defects on the electrophysical and detector properties of CdTe:Cl irradiated by neutrons. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 1–2, pp. 22–29. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.22>

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

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА СО ВСТРОЕННЫМ ПОЗИСТОРНЫМ СЛОЕМ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО НАНОКОМПОЗИТА С УГЛЕРОДНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Экспериментально изучены способности к защите от перенапряжения фотогальванического элемента со встроенным позисторным слоем (полимерный наноккомпозит с углеродным наполнителем), находящимся в непосредственном тепловом контакте с ним. Исследована кинетика изменений электрических характеристик такой структуры при возникновении постоянных электрических перенапряжений на затененном фотогальваническом элементе, когда его р—n-переход оказывается включенным в обратном направлении. Показано, что ток и обратное напряжение на затененном фотогальваническом элементе ограничиваются и снижаются с того момента, когда его температура достигает значений, близких к температуре фазового перехода позисторного наноккомпозита в низкопроводящее состояние, равной примерно 125°C.

Ключевые слова: фотогальванический элемент, электрическое перенапряжение, кинетика, электрические характеристики, позисторный полимерный наноккомпозит, температура срабатывания.

Структуры на основе неоднородных диэлектриков нашли широкое и эффективное применение в современной технике в качестве элементов твердотельной электроники [1—4]. Как правило, их стандартное назначение определено и основные функциональные свойства достаточно изучены. В направлении совершенствования современной элементной базы электроники перспективной является разработка новых элементов. В рамках этой задачи представляется интересным исследование функциональных характеристик комбинированных структур на основе уже известных неоднородных материалов [5—8], однако этому вопросу до настоящего времени не уделялось достаточного внимания.

Особое место среди составляющих элементов указанных комбинированных структур занимают наноккомпозиты для самовосстанавливающихся РРТС (polymeric positive temperature coefficient) предохранителей типа PolySwitch. Эти материалы, представляющие собой наноуглеродный наполнитель в полимерной матрице, являются основой новых направлений решения проблем коммутации и защиты компонентов электрических систем от электрических перегрузок [3, 4]. Их базовое функциональное свойство — скачкообразное, на несколько порядков, увеличение сопротивления при достижении определенной температуры и возврата в исходное высокопроводящее состояние при понижении температуры [3, 4, 9]. Такие элементы нашли уже применение в аккумуляторах и гальванических источниках питания [10—14].

Построение схемотехнических систем защиты компонентов фотоэлектрических систем солнечных

батарей от электрических перегрузок на основе самовосстанавливающихся предохранителей в настоящее время рассматривается как одно из перспективных направлений повышения надежности таких возобновляемых источников электрической энергии. В частности, предложены такие схемотехнические решения:

— ограничение тока при наличии короткого замыкания в параллельном соединении фотоэлектрических модулей, что может быть реализовано включением последовательно с каждым модулем самовосстанавливающегося предохранителя типа PolySwitch [8, 15, 16];

— предотвращение перенапряжений в затененных (или неисправных) фотоэлектрических преобразователях и их последовательных соединениях с помощью ограничителя напряжения на основе двухслойной структуры, состоящей из варистора и РРТС-предохранителя PolySwitch, находящихся в тепловом контакте [17, 18].

Как уже указывалось, отличительным свойством таких предохранителей является резкое возрастание их сопротивления при нагреве до температур, близких к температуре фазового перехода в полиэтилене (около 125°C), называемой температурой срабатывания T_{trip} [3, 4]. Это свидетельствует о еще одном направлении решения проблемы предотвращения локальных перегревов («горячих пятен» [19]) в фотоэлектрических компонентах солнечных батарей, которое основано на срабатывании при повышении температуры распределенного самовосстанавливающегося предохранителя, непосредственно контактирующего с поверхностью фотоэлектрического преобразователя.

Актуальными задачами для продвижения в указанном направлении являются обоснование и апробация такого схемотехнического решения предотвращения локальных перегревов в цепях фотоэлектрических систем солнечных батарей. Следует отметить, что современные фотоэлектрические преобразователи относятся к элементам распределенного пленочного типа (толщина 0,1—0,2 мм, размеры до 15×15 см). При детальном исследовании электротепловых процессов, в частности теплового пробоя, происходящих в таких структурах, необходимо учитывать процессы распространения тепла в плоскости фотоэлектрического преобразователя, что приводит в итоге к сложным в математическом и экспериментальном смысле задачам [20—22]. Тем не менее, для выяснения эффективности и особенностей рассматриваемого здесь способа защиты от перенапряжения можно провести исследование сопровождающих его электрических эффектов, используя структуры небольшой площади, в частности отдельных фотогальванических элементов, для которых неоднородностью предпробойного нагрева можно пренебречь.

В настоящей работе приводятся и анализируются результаты экспериментальных исследований электрических свойств двухслойной структуры, представляющей собой фотогальванический монокристаллический кремниевый элемент с дополнительным слоем позисторного полимерного нанокompозита с углеродным наполнителем, находящегося в тепловом контакте, с целью оценки возможности ограничения электрического напряжения, прикладываемого к обратно включенному фотогальваническому элементу.

Исследуемая структура и ее схемотехническое представление

Структура образцов и эквивалентная электрическая схема образцов фотогальванического элемента с защитой от перенапряжений на основе двухслойных структур из монокристаллического кремниевого фотогальванического элемента (PV cell) и полимерного позисторного нанокompозита с углеродным наполнителем (PPTC fuse) представлены на **рис. 1**.

В экспериментах в качестве фотогальванического элемента использовались фрагменты солнечных элементов, изготовленных на основе монокристаллического кремния КДБ-10 с просветляющим покрытием на основе ИТО-пленки [9, 23] (толщина 0,1 мм, площадь до 4 см²). Вторым слоем был рабочий элемент PPTC-предохранителя типа FRX375-60F (слой диаметром 28,5 мм и толщиной 1,6 мм, сопротивление элемента в проводящем состоянии составляет 0,08 Ом, $T_{irp} = 125^\circ\text{C}$) [24, 25]. Тепловой контакт между слоями обеспечивался использованием кремниевой теплопроводной пасты КПТ-8 [26].

Исследования производились с использованием схемы, изображенной на **рис. 2**. Входное напряжение U подавалось от стандартного регулируемого источ-

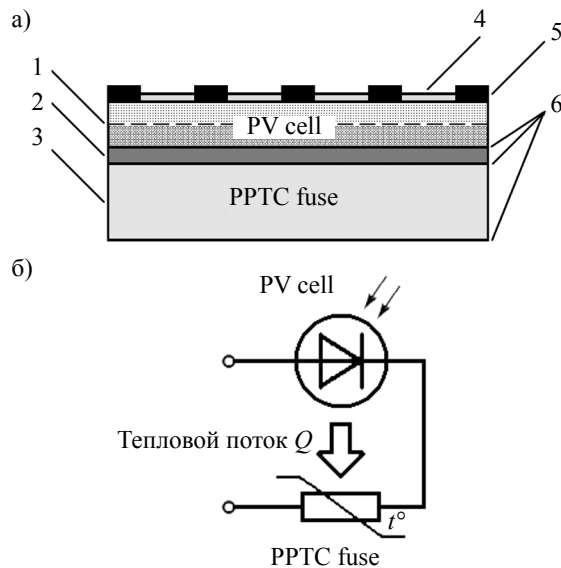


Рис. 1. Исследуемая структура (а) и ее электрическая схема (б):

1 — p - n -переход фотогальванического элемента; 2 — теплопроводящая паста; 3 — позисторный нанокompозит; 4, 5 — антиотражающее покрытие и металлическая сетка (электрод) слоя фотогальванического элемента; 6 — электродные слои

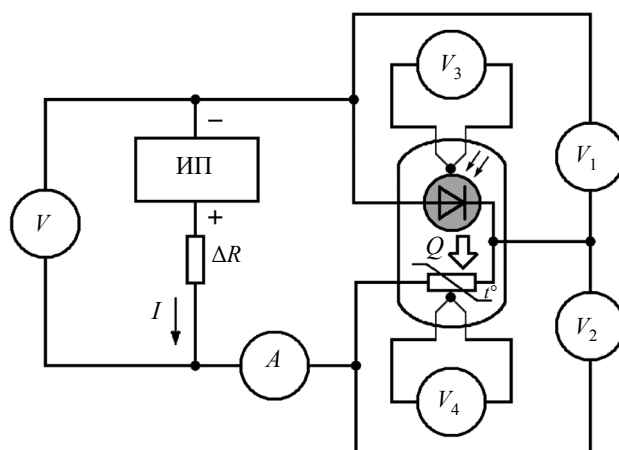


Рис. 2. Схема измерения электрических характеристик исследуемой структуры:

V_1, V_2 — вольтметры для измерения напряжения на фотогальваническом (U_{PV}) и позисторном (U_{PPTC}) элементах; V_3, V_4 — вольтметры для фиксации температуры фотогальванического (T_{PV}) и позисторного (T_{PPTC}) элементов; A — амперметр для измерения протекающего через структуру тока (I); V — вольтметр для контроля напряжения источника питания; ΔR — добавочное внутреннее сопротивление источника напряжения

ника напряжения типа TEC14 (ИП). Измерения тока I и напряжения на элементах исследуемой структуры (U_{PV}, U_{PPTC}) проводились коммерческими вольтметрами и амперметром, значения их температуры (T_{PV}, T_{PPTC}) фиксировались термopарами.

Состояние разогрева затененного фотогальванического элемента и всей рассматриваемой структуры достигалось подачей на него постоянного на-

пряжения в направлении обратного смещения p — n -перехода [27]. Кинетика изменения указанных параметров фиксировалась в синхронном режиме посекундно в течение времени t , достаточного для релаксации исследуемой структуры до равновесного состояния ($t \approx 10$ мин).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Кинетика процесса ограничения напряжения фотогальванического элемента с позисторным слоем

При проведении исследований электронный p — n -переход затененного фотогальванического элемента был включен в обратном направлении, что соответствует наиболее неблагоприятной ситуации, когда становится возможным его тепловой пробой [19, 28, 29].

Кинетические зависимости тока, напряжения и температуры рассматриваемой двухслойной структуры на основе монокристаллического кремниевого фотогальванического элемента и РРТС-предохранителя представлены на **рис. 3**. Как видно, на начальных участках ($t < 100$ с) указанные временные зависимости подобны тем, что наблюдаются для фотогальванических элементов в предпробойном режиме [27]. При достижении позисторным элементом температуры срабатывания T_{trip} (кривая 5), т. е. при переходе его в состояние с высоким электрическим сопротивлением, имеет место перераспределение прикладываемого напряжения U в сторону существенного его

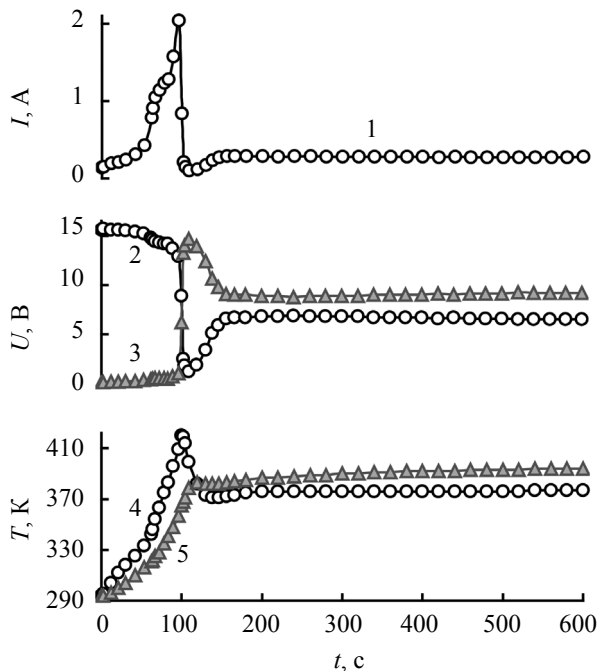


Рис. 3. Изменение во времени тока (I), напряжения и температуры фотогальванического (2, 4) и позисторного (3, 5) элементов исследуемой структуры при подаче на нее постоянного напряжения 16 В

уменьшения на фотогальваническом элементе (кривая 2) и уменьшения тока (кривая 1). Значения температуры обоих элементов исследованной структуры после срабатывания позисторного элемента близки к T_{trip} и в дальнейшем не изменяются.

Из представленных данных следует, что:

- рассматриваемые структуры обладают способностью ограничения температуры;
- после срабатывания термочувствительного позисторного элемента температура остается постоянной и является практически одинаковой для всей структуры;
- максимальное значение тока через структуру наблюдается короткое время (порядка нескольких секунд);
- в области ограничения температуры все напряжение (прикладываемое вначале к фотогальваническому элементу) перераспределяется и его значительная часть падает на позисторном элементе.

Влияние амплитуды перенапряжения и внутреннего сопротивления источника напряжения на кинетику процесса

Как известно, одним из наиболее влиятельных факторов, который может привести к пробоем фотогальванического элемента, является прикладываемое к нему обратное напряжение. Это имеет место в фотоэлектрических модулях солнечных батарей, когда фотогальванический элемент затенен, неисправен или подвергся деградации. В таком случае он выступает в качестве активного сопротивления и не является источником тока.

На **рис. 4** можно увидеть, как величина (амплитуда) прикладываемого обратного постоянного напряжения U влияет на кинетику процесса ограничения напряжения фотогальванического элемента с позисторным слоем. С ростом напряжения наблюдается уменьшение времени достижения граничной температуры при перенапряжении и увеличение максимального тока через исследуемую структуру. Температурный режим при этом изменяется незначительно. Возникновение большого максимального тока при температуре структуры, меньшей температуры срабатывания защитного позисторного элемента, может привести к такому нежелательному эффекту, как пробой фотогальванического элемента, который произойдет до срабатывания рассматриваемой здесь защиты от перенапряжений.

При этом, однако, следует отметить, что в реальных условиях ток и напряжение источника питания являются ограниченными, например, в фотоэлектрических модулях солнечных батарей они не могут быть больше тока короткого замыкания и напряжения холостого хода фотоэлектрического модуля [30]. В этом случае может реализоваться ситуация, когда с ростом температуры сопротивление фотогальванического элемента становится сравнимым с внутрен-

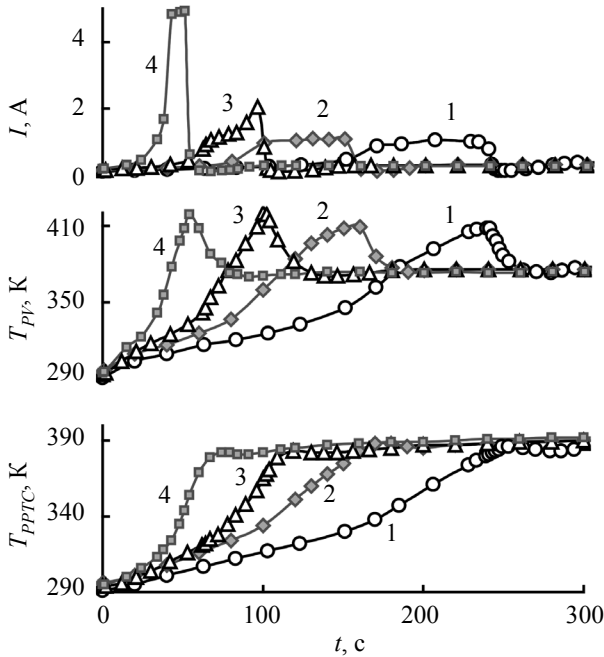


Рис. 4. Изменение во времени тока (I) и температуры фотогальванического (T_{PV}) и позисторного (T_{PPTC}) элементов исследуемой структуры при подаче на нее постоянного напряжения U (в В):
1 — 14; 2 — 15; 3 — 16; 4 — 17

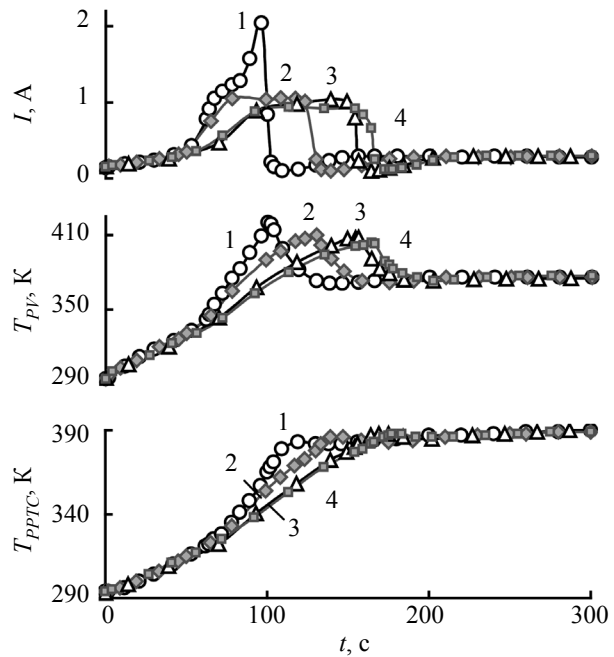


Рис. 5. Изменение во времени параметров I , T_{PV} и T_{PPTC} исследуемой структуры при подаче на нее постоянного напряжения $U = 16$ В и введении добавочных резисторов с сопротивлением ΔR (в Ом):
1 — 1; 2 — 1,5; 3 — 2; 4 — 3

ним сопротивлением источника питания до перехода в изолирующее состояние позисторного элемента.

Представленные на **рис. 5** временные зависимости изменения тока и напряжения получены при введении в схему источника питания добавочных резисторов с сопротивлением ΔR (см. рис. 2). Здесь видно, что увеличение внутреннего сопротивления источника питания приводит к снижению пика тока и его размытию и смещению в сторону большего значения времени. То есть, энергия, необходимая для нагрева исследуемой структуры до температуры срабатывания защиты, накапливается дольше.

Влияние параметров теплового контакта между фотогальваническим и позисторным элементами на кинетику процесса

Наиболее важным параметром, влияющим на протекающие в рассматриваемой двухслойной структуре процессы, является тепловое сопротивление RT контакта между фотогальваническим и позисторным элементами. При проведении исследований величина RT варьировалась путем изменения площади контакта, которое осуществлялось сдвигом слоев фотогальванического элемента и позистора друг относительно друга. Меньшая площадь перекрытия слоев соответствовала большему значению RT .

Как видно из **рис. 6**, от величины теплового сопротивления контакта больше всего зависит ток, протекающий через рассматриваемую структуру. При плохой

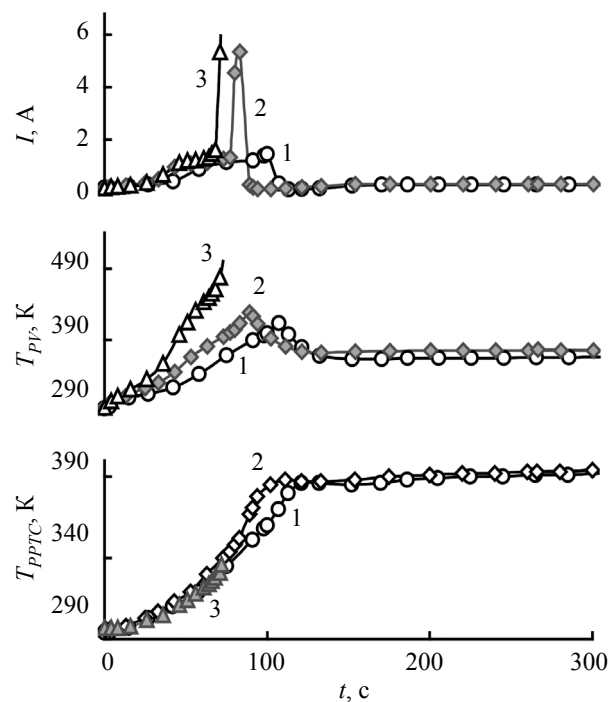


Рис. 6. Изменение во времени параметров I , T_{PV} и T_{PPTC} исследуемой структуры при подаче на нее постоянного напряжения $U = 16$ В при различных значениях теплового сопротивления контакта RT между фотогальваническим и позисторным элементами:

1 — RT_1 ; 2 — RT_2 ; 3 — RT_3

($RT_1 < RT_2 < RT_3$ и соответствуют перекрытию слоев на 100, 60 и 30 %)

теплопередаче между слоями варисторной керамики и РРТС-нанокompозита ток существенно возрастает, что может привести к тепловому пробую фотогальванического элемента. Чем больше значение RT , тем больший ток требуется для обеспечения теплопередачи, необходимой для достижения позисторным слоем температуры срабатывания. При очень большом RT (кривая 3) реализуется состояние, когда фотогальванический элемент практически теплоизолирован, что ведет к его тепловому пробую.

Выводы

Исследования характеристик двухслойной структуры на основе фотогальванического полупроводникового элемента и позисторного слоя, находящихся в тепловом контакте, показали, что обратное напряжение на затененном, неисправном или деградированном фотогальваническом элементе ограничивается и снижается с того момента, когда температура этой структуры достигает значений, близких к температуре перехода позисторного нанокompозита в низкотеплопроводящее состояние, т. е. не превышает 125°C . С ростом величины перенапряжения наблюдается уменьшение времени срабатывания рассматриваемой защиты и увеличение максимального тока через исследуемую структуру. Температурные режимы при этом изменяются незначительно. Уменьшение тока, необходимого для достижения позисторным слоем температуры срабатывания, может быть достигнуто снижением теплового сопротивления контакта между фотогальваническим и позисторным элементами структуры. Полученные результаты указывают на то, что введение позисторных слоев рассматриваемого типа в структуру фотогальванических элементов может быть использовано в качестве их защиты от перенапряжений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, iss. 7, pp. 1817–1840. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x>
- Standler R. B. *Protection of electronic circuits from overvoltages*. USA, Mineola, New York. Dover Publications, Inc. 2002. 464 p.
- Gretzke W. Use of PolySwitch PPTC protection in automotive applications. In book: *42 V-PowerNets*. Eds. by H. Wallentowitz, C. Amsel. Germany, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2003, pp. 75–87. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18139-9_4
- Гавриков В. Самовосстанавливающиеся РТС-предохранители для защиты от токовых перегрузок. *Новости Электроники*, 2014, № 12, с. 11–15.
- Golubovic B., Becker P. N., Moore R. P. *Circuit protection device having thermally coupled MOV overvoltage element and PPTC overcurrent element*. Pat. USA, no. 7660096, 2010.
- Du Y., Kim H., Jiang T. *Solid state resettable fuses*. Pat. USA, no. 9998117, 2018.
- Anthony A. A. *Polymer fuse and filter apparatus*. Pat. USA, no. 6282074, 2001.
- Тонкошкур О. С., Иванченко О. В., Мазурик С. В., Макаров В. О. *Пристрій захисту фотоелектричних модулів від струму перенавантаження*. Пат. 134899 України, 2019, бюл. №11.
- 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. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2018.1.43>
- Cheon K. Y. *Battery pack with battery protection circuit*. Pat. USA no. 5963019, 1999.
- Oglesbee J. W., Burns A. G., More G. *Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries*. Pat. USA, no. 6608470, 2003.
- Minervini A. D., Nguyen T. K. *Electrical devices having a polymer PTC array*. Pat. USA, no. 6282072, 2001.
- Littelfuse Inc. *Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries*, http://www.littelfuse.com/~media/electronics/application_notes/littelfuse_protecting_rechargeable_li_ion_and_li_polymer_batteries_in_consumer_portable_electronics_application_note.pdf (27 February 2020)
- Dimpault-Darcy E. C., Bragg B. J. *Thermal switch disc for short circuit protection of batteries*. Pat. USA, no. 4973936, 1990.
- Тонкошкур А. С., Накашидзе Л. В. Моделирование ограничения тока в фотоэлектрических системах солнечных батарей с использованием самовосстанавливающихся предохранителей PolySwitch. *Радиоэлектроника, информатика, управління*, 2019, № 2, с. 15–22. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-2-2>
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Modeling of electrical characteristics of photovoltaic solar arrays with protection against current overloads based on PolySwitch elements. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2019, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/MMMS-01-2019-0022>
- Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2019, vol. 9, no. 03, p. 1950023. <https://doi.org/10.1142/S2010135X19500231>
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of varistor-posistor structure for protection from overvoltages of photovoltaic cells of solar arrays. *Journal of Physics and Electronics*, 2019, vol. 27, no. 1, pp. 79–88. <https://doi.org/10.15421/331913>
- Herrmann W., Adrian M., Wiesner W. Operational behaviour of commercial solar cells under reverse biased conditions. *Proceedings of the Second World conference on photovoltaic solar energy conversion*. Austria, Vienna, 1998, pp. 2357–2359.
- Воробьев Г. А., Похолоков Ю. П., Королев Ю. Д., Меркулов В. И. *Физика диэлектриков (область сильных полей): Учебное пособие*, Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2011.
- Чумаков В. И. Методы моделирования тепловых повреждений полупроводниковых приборов. *Радиоэлектроника и информатика*, 1999, № 2, с. 31–37.
- Virchenko Yu. P., Vodyanitskii A. A. Heat localization and formation of heat breakdown structure in semiconductor materials. I. Nonlinear model. *Functional Materials*, 2001, vol. 8, no. 3, pp. 428–434.
- Накашидзе Л. В., Кныш Л. И. Методология определения состава и схемных решений солнечных фотоэлектрических установок. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2008, № 10(57), с. 100–103.
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of “PolySwitch” fuses for the limitation of current overloads in photovoltaic systems of solar arrays. *Journal of Physics and Electronics*, 2018, vol. 26, no 1, p. 77–82. <https://doi.org/10.15421/331813>
- FRX Series - Radial Leaded PTC. http://www.fuzetec.com/products_2.php?bgid=1&gid=31 (27 February 2020)
- Теплопроводность термораст, сравнение термораст по теплопроводности и вязкости. <http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnenie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkost> (27 февраля 2019)

27. Иванченко А. В., Тонкошкур А. Изменения характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей после токовых перегрузок. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 3–4, с. 19–25. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.19>

28. d'Alessandro V., Guerriero P., Daliento S. A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 405–413. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282736>

29. Daliento S., Di Napoli F., Guerriero P., d'Alessandro V. A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading. *Solar Energy*. 2016, vol. 134, pp. 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.001>

30. Раушенбах Г. *Справочник по проектированию солнечных батарей*. Москва, Энергоатомиздат, 1983.

Дата поступления рукописи
в редакцию 12.02 2020 г.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.30

УДК 621.31

О. В. ИВАНЧЕНКО, О. С. ТОНКОШКУР

Україна, Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ФОТОГАЛЬВАНІЧНОГО ЕЛЕМЕНТА З ВБУДОВАНИМ ПОЗИСТОРНИМ ШАРОМ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРНОГО НАНОКОМПОЗИТУ З ВУГЛЕЦЕВИМ НАПОВНЮВАЧЕМ

Розглянуто проблеми запобігання перегріву і теплового пробою фотогальванічного елементу при прикладенні до його р—п-переходу високої зворотної напруги. Експериментально вивчено здатність до захисту від перенапруги структури у вигляді фотогальванічного елемента з вбудованим позисторним шаром, що знаходяться в безпосередньому тепловому контакті. Як фотогальванічний елемент використовувалися фрагменти сонячних елементів, виготовлених на основі монокристалічного кремнію. Позисторним шаром був полімерний наноккомпозит з вуглецевим наповнювачем, який використовується в самовідновлювальних запобіжниках типу PolySwitch.

Досліджено кінетику змін електричних характеристик такої структури при виникненні постійної електричної перенапруги на затіненому фотогальванічному елементі, коли його р—п-перехід опиняється включеним у зворотному напрямку. Показано, що струм і зворотна напруга на затіненому фотогальванічному елементі обмежуються і зменшуються з моменту, коли температура цієї структури досягає значень, близьких до температури переходу позисторного наноккомпозиту в низькопровідний стан, що дорівнює приблизно 125°C. При збільшенні величини перенапруги спостерігається зменшення часу спрацьовування розглянутого захисту і зростання максимального струму, який протікає досліджуваною структурою. Зменшення струму, необхідного для досягнення позисторним шаром температури спрацьовування, може бути досягнуто зниженням теплового опору контакту між фотогальванічним і позисторним елементами структури.

Отримані результати вказують на можливість реалізації захисту від зворотних електричних перенапруг і теплового пробою фотоелектричних систем на основі фотогальванічних елементів з вбудованими шарами запобіжників зазначеного типу.

Ключові слова: фотогальванічний елемент, електрична перенапруга, кінетика, електричні характеристики, позисторний полімерний наноккомпозит, температура спрацьовування.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.30

UDC 621.31

A. V. IVANCHENKO, A. S. TONKOSHKUR

Ukraine, Oles Honchar Dnipro National University

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

ELECTRICAL PROPERTIES OF PHOTOGALVANIC ELEMENT WITH BUILT-IN POSISTOR LAYER BASED ON POLYMER NANOCOMPOSITE WITH CARBON FILLER

The study considers the problem of preventing overheat and thermal breakdown of a photovoltaic cell when a high reverse voltage is applied to its p—n junction. The overvoltage protection ability of a structure made up of a photovoltaic cell in direct thermal contact with a built-in posistor layer has been experimentally studied. Fragments of solar cells based on single-crystal silicon were used as a photovoltaic cells. The posistor layer was a polymer nanocomposite with carbon filler used in the resettable fuses of the “PolySwitch” technology.

The authors study kinetics of changes in the electrical characteristics of such a structure under constant electric overvoltage on a shaded photovoltaic cell, when its p—n junction is turned on in the reverse direction. It is shown that the current and reverse voltage on the shaded photovoltaic cell are limited and reduced from the moment when the temperature of this structure reaches the values close to the temperature of the phase transition of the posistor nanocomposite to the low-conductive state, which is $\approx 125^{\circ}\text{C}$. With an increase in the overvoltage value, a decrease in the response time of the considered protection and

an increase in the maximum current value through the structure under study are observed. A decrease in the current value required to reach the tripping temperature by the posistor layer can be achieved by reducing the thermal resistance of the contact between the photovoltaic and posistor elements of the structure.

The results obtained indicate the possibility of implementing protection against reverse electrical overvoltage and thermal breakdown of photovoltaic systems based on photovoltaic cells with built-in fuse layers of a specified type.

Keywords: photovoltaic cell, electrical overvoltage, kinetics, electrical characteristics, posistor polymer nanocomposite, tripping temperature.

REFERENCES

1. Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, iss. 7, pp. 1817–1840. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x>
2. Standler R. B. *Protection of electronic circuits from overvoltages*. USA, Mineola, New York. Dover Publications, Inc. 2002. 464 p.
3. Gretzke W. Use of PolySwitch PPTC protection in automotive applications. In book: 42 *V-PowerNets*. Eds. by H. Wallentowitz, C. Amsel. Germany, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2003, pp. 75–87. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18139-9_4
4. Gavrikov V. [Resettable PTC fuses for protection of current overload]. *Novosti Elektroniki*, 2014, no. 12, pp. 11–15. (Rus)
5. Golubovic B., Becker P. N., Moore R. P. *Circuit protection device having thermally coupled MOV overvoltage element and PPTC overcurrent element*. Pat. USA, no. 7660096, 2010.
6. Du Y., Kim H., Jiang T. *Solid state resettable fuses*. Pat. USA, no. 9998117, 2018.
7. Anthony A. A. *Polymer fuse and filter apparatus*. Pat. USA, no. 6282074, 2001.
8. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Mazurik S. V., Makarov V. O. [Device for protection of photovoltaic modules against overload current]. Pat. UA, no. 134899, 2019, bull 11. (Ukr)
9. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V., Mazurik S. V. Application of resettable elements for electrical protection of solar batteries. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 1, pp. 43–49. <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.1.43> (Rus)
10. Cheon K. Y. *Battery pack with battery protection circuit*. Pat. USA no. 5963019, 1999.
11. Oglesbee J. W., Burns A. G., More G. *Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries*. Pat. USA, no. 6608470, 2003.
12. Minervini A. D., Nguyen T. K. *Electrical devices having a polymer PTC array*. Pat. USA, no. 6282072, 2001.
13. Littelfuse Inc. *Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries*, 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 (27 February 2020)
14. Dimpault-Darcy E. C., Bragg B. J. *Thermal switch disc for short circuit protection of batteries*. Pat. USA, no. 4973936, 1990.
15. Tonkoshkur A. S., Nakashidze L. V. Modeling of current limitations in photo-electrical systems of solar batteries using self-restoring fuses Polyswitch. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, no. 2, pp. 15–22. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-2-2> (Rus)
16. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Modeling of electrical characteristics of photovoltaic solar arrays with protection against current overloads based on PolySwitch elements. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2019, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/MMMS-01-2019-0022>
17. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Electrical properties of structures based on varistor ceramics and polymer nanocomposites with carbon filler. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2019, vol. 9, no. 03, p. 1950023. <https://doi.org/10.1142/S2010135X19500231>
18. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of varistor-posistor structure for protection from overvoltages of photovoltaic cells of solar arrays. *Journal of Physics and Electronics*, 2019, vol. 27, no. 1, pp. 79–88. <https://doi.org/10.15421/331913>
19. Herrmann W., Adrian M., Wiesner W. Operational behaviour of commercial solar cells under reverse biased conditions. *Proceedings of the Second World conference on photovoltaic solar energy conversion*. Austria, Vienna, 1998, pp. 2357–2359.
20. Vorob'yov G. A., Pokholkov Yu. P., Korolev Yu. D., Merkulov V. I. [Physics of dielectrics (region of strong fields): Study Guide], Russia, Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2011, 245 p. (Rus)
21. Chumakov V. I. [Methods for modeling thermal damages to semiconductor devices]. *Radioelektronika i informatika*, 1999, no. 2, pp. 31–37. (Rus)
22. Virchenko Yu. P., Vodyanitskii A. A. Heat localization and formation of heat breakdown structure in semiconductor materials. I. Nonlinear model. *Functional Materials*, 2001, vol. 8, no. 3, pp. 428–434.
23. 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. 100–103. (Rus)
24. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Mazurik S. V. Application of “PolySwitch” fuses for the limitation of current overloads in photovoltaic systems of solar arrays. *Journal of Physics and Electronics*, 2018, vol. 26, no 1, p. 77–82. <https://doi.org/10.15421/331813>
25. *FRX Series - Radial Leaded PTC*. http://www.fuzetec.com/products_2.php?bgid=1&gid=31 (27 February 2020)
26. [The thermal conductivity of the thermal pastes, comparison of the thermal pastes for thermal conductivity and viscosity]. <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnienie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkost> (27 February 2020) (Rus)
27. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Changes in the characteristics of silicon photovoltaic cells of solar arrays after current overloads. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 3–4, pp. 19–25. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.3-4.19> (Rus)
28. d'Alessandro V., Guerriero P., Daliento S. A simple bipolar transistor-based bypass approach for photovoltaic modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 405–413. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2282736>
29. Daliento S., Di Napoli F., Guerriero P., d'Alessandro V. A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading. *Solar Energy*. 2016, vol. 134, pp. 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.001>
30. Raushenbakh G. [Handbook on the design of solar batteries] Moscow, Energoatizdat, 1983, 357 p. (Rus)

Описание статьи для цитирования:

Иванченко А. В., Тонкошкур А. С. Электрические свойства фотогальванического элемента со встроенным позисторным слоем на основе полимерного нанокompозита с углеродным наполнителем. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 1–2, с. 30–36. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.30>

Cite the article as:

Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Electrical properties of photogalvanic element with built-in posistor layer based on polymer nanocomposite with carbon filler. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 1–2, pp. 30–36. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.30>

Д. т. н. Ю. Є. НИКОЛАЄНКО, к. т. н. О. В. БАРАНИЮК, к. т. н. С. А. РЕВА

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

E-mail: yunikola@ukr.net

ТЕПЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РІДИННОГО ТЕПЛООБМІННИКА ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОГО МОДУЛЯ АФАР

Проведено чисельне моделювання температурного поля та загального теплового опору рідинного теплообмінника у вигляді холодної плити із вбудованим вигнутим одинарним контуром охолодження та двостороннім розташуванням тепловіділяючих НВЧ-елементів, призначеного для охолодження багатоканального приймально-передавального модуля. Дослідження проводилися за різних значень витрат рідкого теплоносія (Тосол А 65).

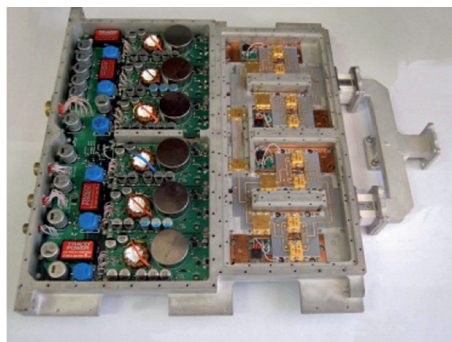
Ключевые слова: CFD-моделювання, рідинний теплообмінник, температурне поле, тепловий опір, приймально-передавальний модуль, НВЧ-елемент.

Радіолокаційні станції постійно удосконалюються в напрямку розширення сфер застосування, підвищення багатфункціональності, компактності, технічних характеристик і зниження вартості [1—4]. Одним з напрямків удосконалювання радіолокаційних станцій є використання активних фазованих антенних решіток (АФАР) і перехід на нову твердотільну мікрохвильову елементну базу [4—8]. Сучасна АФАР містить тисячі приймально-передавальних модулів (ППМ) [9]. Найбільш тепловіділяючими функціональними вузлами в ППМ є вихідні підсилювачі потужності. При цьому ККД кращих твердотільних підсилювачів потужності становить приблизно 25%, а близько 75% споживаної енергії розсіюється у вигляді теплоти [10] і призводить до погіршення робочих характеристик та зниження надійності роботи антенної системи [11, 12]. У зв'язку із цим, при проектуванні ППМ АФАР гостро стоїть питання зниження температури тепловіділяючих НВЧ-елементів, а в багатоканальних ППМ це ще й проблема вирівнювання температури всіх каналів — різниця має бути не більшою за 10°C [13, 14].

Для забезпечення заданого теплового режиму ППМ використовуються як повітряні [15—17], так і рідинні [14, 18—20] системи охолодження. Не дивлячись на простоту конструкції та низьку вартість повітряних систем охолодження, їхнє застосування в умовах підвищених теплових навантажень і жорстких вимог до температури активних НВЧ-елементів не завжди можливе. У таких випадках більш ефективними є рідинні системи охолодження. Конструктивно їх виконують у вигляді холодної плити із вбудованими охолоджуючими каналами, а найбільш тепловіділяючі елементи прагнуть розташовувати на її поверхнях ближче до стінок цих каналів [14, 18, 19].

Приклад конструктивного виконання вихідного підсилювача потужності радіолокаційної станції 3-см діапазону довжин хвиль зі знятими кришками показано на **рис. 1, а**. Його вихідна імпульсна потужність — 500 Вт. Тепловіділяючі елементи — нітрид-галієві НВЧ-транзистори — встановлено на рідинному теплообміннику-радіаторі, каналами якого прокачується вода з температурою на вході 20°C. У [21] показано, що зі збільшенням витрати

а)



б)



Рис. 1. Модулі вихідного підсилювача потужності з одностороннім [21] (а) та двостороннім [22] (б) розташуванням тепловіділяючих елементів

води від 10 до 100 л/хв температура основи модуля зменшується від 53 до 33°C.

У [22] охолодження 32-канального ППМ цифрової АФАР (рис. 1, б) здійснюється за допомогою вбудованого в загальну основу корпусу ППМ внутрішнього здвоєного контуру рідинного охолодження, тепловіділяючі елементи розміщуються дзеркально на двох сторонах теплообмінника. Як контур охолодження використовується вигнута пласка мідна трубка. Корпус ППМ із двох сторін герметично закривається кришками.

В [10] наведено результати експериментального дослідження теплових і гідравлічних характеристик рідинного теплообмінника розмірами $300 \times 300 \times 30$ мм із одинарним та зі здвоєним контурами рідинного охолодження. Потужність, що підводиться, складає 336 Вт. Показано, що при збільшенні витрати теплоносія (Тосол А 65) від 1,5 до 7,8 л/хв тепловий опір теплообмінника зі здвоєним контуром охолодження зменшується від 0,044 до 0,013 °C/Вт, а втрати тиску збільшуються від 0,1 до 1,7 атм. Порівняно зі здвоєним рідинним контуром у теплообміннику з одинарним контуром тепловий опір збільшується до 50%, а перепад тиску знижується до 20%.

Оскільки виготовлення експериментальних зразків є достатньо дорогим, знизити витрати на дослідження теплових характеристик дозволяє комп'ютерне моделювання, яке широко використовується в тепловому конструюванні (наприклад, [23—25]) і є достатньо ефективним.

В даній роботі наводяться результати чисельного моделювання температурного поля та визначення загального теплового опору рідинного теплообмінника у вигляді холодної плити із вбудованим вигнутим одинарним контуром охолодження та двостороннім розташуванням охолоджуваних елементів, яке проводилося у продовження досліджень [26].

CFD-модель рідинного теплообмінника ППМ

Об'єктом чисельного моделювання була конструкція рідинного теплообмінника у вигляді холодної плити, яка є базовою несучою конструкцією багатоканального ППМ активної фазованої антени решітки. Розміщення тепловиділяючих НВЧ-елементів на його монтажних поверхнях показано на **рис. 2**.

Конструктивно рідинний теплообмінник виконано із двох скріплених між собою пластин товщиною 6 мм із алюмінієвого сплаву з коефіцієнтом теплопровідності 132 Вт/(м·°С). В середині теплообмінника виконано вигнутий охолоджуючий канал з радіусом вигинів 30 мм загальною довжиною 1651 мм. Його поперечний переріз наближений до прямокутника розмірами 5×10 мм із закругленнями радіусом 0,5 мм, площа перерізу — 49,785 мм², змочений периметр — 29,142 мм. Еквівалентний діаметр охолоджуючого каналу — 6,83 мм.

Із двох сторін рідинного теплообмінника уздовж прямої частини охолоджуючого каналу довжиною 444 мм (див. рис. 2) розташовано по 8 локальних тепловиділяючих активних НВЧ-елементів (№№ 1—16) циліндричної форми з діаметром контактної поверхні з теплообмінником 10 мм потужністю 11 Вт кожний. Відстань між центрами сусідніх НВЧ-елементів, розташованих по різні боки каналу, становить 30 мм, по один бік — 120 мм. На кожній стороні рідинного теплообмінника встановлено також по одному електронному блоку (№№ 17, 18) прямокутної форми з тепловим потоком 50 Вт, рівномірно розосередженим по контактній поверхні основи, розмірами 225×352 мм.

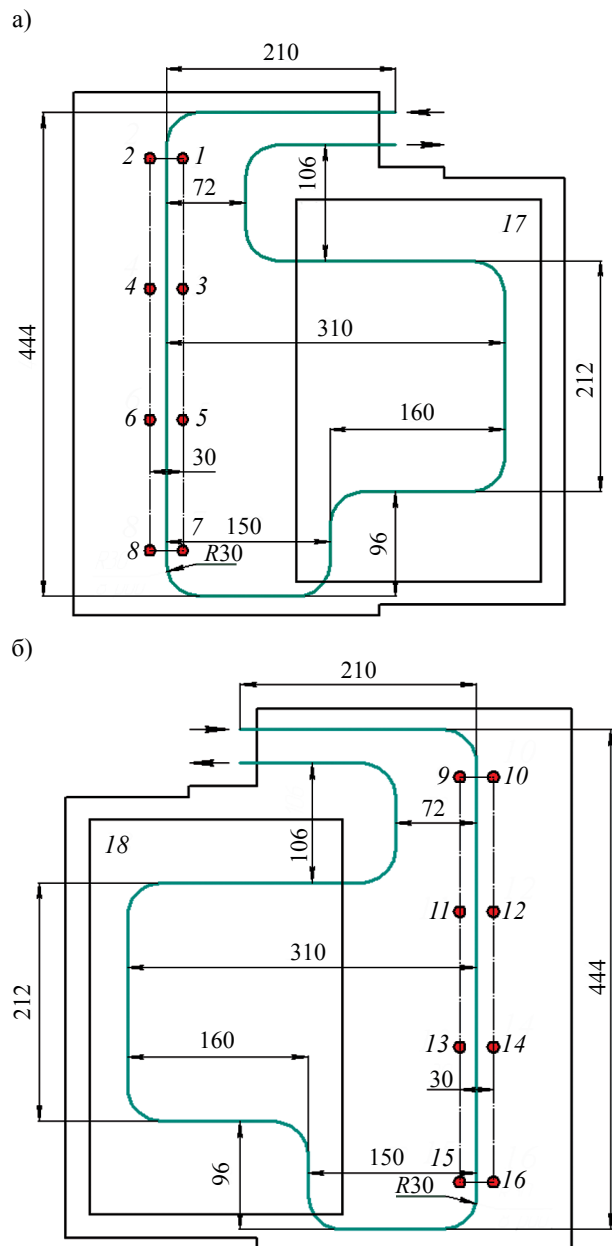


Рис. 2. Розташування локальних джерел тепловиділення (№№ 1—16) та блоків з малопотужними елементами (№№ 17, 18) на верхній (а) та нижній (б) монтажних поверхнях рідинного теплообмінника

Таким чином, загальна теплова потужність, що підводиться до рідинного теплообмінника із двох сторін, становить 276 Вт.

Теплоносієм було обрано Тосол А 65 (65%-ва суміш етиленгліколя з домішкою незначної кількості пропіленгліколя та полігліколей з дистильованою водою) з температурою замерзання не вищою за мінус 65°C.

Методика моделювання

Дослідження проводилося в академічній версії програми ANSYS-Fluent. CFD-модель, методика моделювання, розрахункові сітки, система рівнянь та обчислювальний алгоритм були докладно описані в [26]. При моделюванні застосовуються нерівномірні розрахункові сітки, що дозволяє представити фізико-математичний опис руху теплоносія всередині вигнутого охолоджуючого каналу. Розрахункова область містить 4 млн чарунок. Для моделювання руху та теплообміну рідини використовуються рівняння Нав'є — Стокса, енергії та нерозривності, які описують у нестационарній постановці закони збереження маси, імпульсу та енергії цієї рідини. Теплофізичні властивості теплоносія описуються поліноміальними залежностями від температури.

На вході в рідинний теплообмінник встановлювалися витрата (від 2 до 10 л/хв) та температура теплоносія (50°C).

На виході теплообмінника задавалися умови сталості витрати теплоносія, а саме гранична умова «outflow»: вся рідина, яка увійшла в розрахункову область, виходить через поверхню, на якій задається ця умова.

Зовнішня поверхня конструкції теплообмінника вважалася адіабатною. Режим течії в каналі залежав від витрати теплоносія: при 2—6 л/хв режим перехідний ($2300 < Re < 10000$), при 8—10 л/хв — турбулентний ($Re > 10000$).

Поставлена задача вирішувалася як задача спряженого теплообміну, коефіцієнти тепловіддачі на границі «рідина — стінка» розраховувалися з використанням пристінних функцій, які при моделюванні реалізовувалися засобами ANSYS-Fluent.

Результати й обговорення

Температурне поле охолоджуючої плити

У випадку симетричного розташування джерел тепловиділення на обох сторонах охолоджуючої плити температурні поля на її верхній та нижній монтажних поверхнях не відрізняються між собою, тому на **рис. 3** показано розподіл температури тільки для однієї поверхні. Ділянки поверхні з однаковою температурою виділені певним кольором і об'єднані ізотермами із зазначенням відповідної температури.

З представлених температурних полів видно, що в місцях установки НВЧ-елементів, ближчих до входу охолоджуючого каналу, температура нижче, ніж в

інших. Це є природним, оскільки ця область теплообмінника охолоджується вхідним потоком теплоносія. Поблизу наступних по ходу теплоносія джерел теплоти температура монтажних поверхонь постійно підвищується, але ближче до місця вигину охолоджуючого каналу, де розташовані елементи № 7 та № 8, ріст температури вповільнюється. Це можна пояснити додатковою турбулізацією потоку теплоносія та підвищення ефективності конвективного теплообміну в місці вигину.

Значення температури в прямокутній області, де розміщено електронний блок з малопотужними елементами (джерело тепловиділення № 17), лежать між максимальним та мінімальним значеннями температури поверхонь з установленими локальними активними НВЧ-елементами.

За допомогою моделювання були визначені максимальні значення температури t_i поверхні рідинного теплообмінника в місцях розташування джерел теплоти за різних витрат теплоносія G , а також різниця $\Delta t_{i \max}$ між її значеннями при мінімальній (2 л/хв) та максимальній (10 л/хв) витраті теплоносія. Результати наведено у **табл. 1**.

Як видно з **табл. 1**, максимальна температура в місцях установки тепловиділяючого джерела при зміні витрати теплоносія G від 2 до 10 л/хв знижується на 8,35—10,70°C залежно від розташування джерела теплоти відносно входу охолоджуючого каналу та його потужності.

На **рис. 4** представлено залежності $t = f(G)$ для двох точок поверхні плити: найбільш нагрітої — в місці приєднання локального джерела теплоти № 6, та найменш нагрітої — в місці розташування

Таблиця 1

Максимальні значення температури t_i поверхні рідинного теплообмінника в місцях приєднання джерел теплоти при різних витратах теплоносія

№ джерела теплоти	Значення t_i , °C, при витраті теплоносія, л/хв:					$\Delta t_{i \max}$, °C
	2	4	6	8	10	
1	65,41	60,45	58,64	57,67	57,06	8,35
2	66,85	61,62	59,66	58,58	57,89	8,96
3	67,74	62,12	59,98	58,82	58,07	9,67
4	68,50	62,70	60,46	59,23	58,43	10,07
5	68,82	62,84	60,54	59,28	58,47	10,35
6	69,36	63,23	60,83	59,51	58,66	10,70
7	67,55	61,75	59,59	58,44	57,72	9,83
8	68,68	62,70	60,42	59,19	58,40	10,28
17	62,50	57,44	55,63	54,70	54,13	8,37

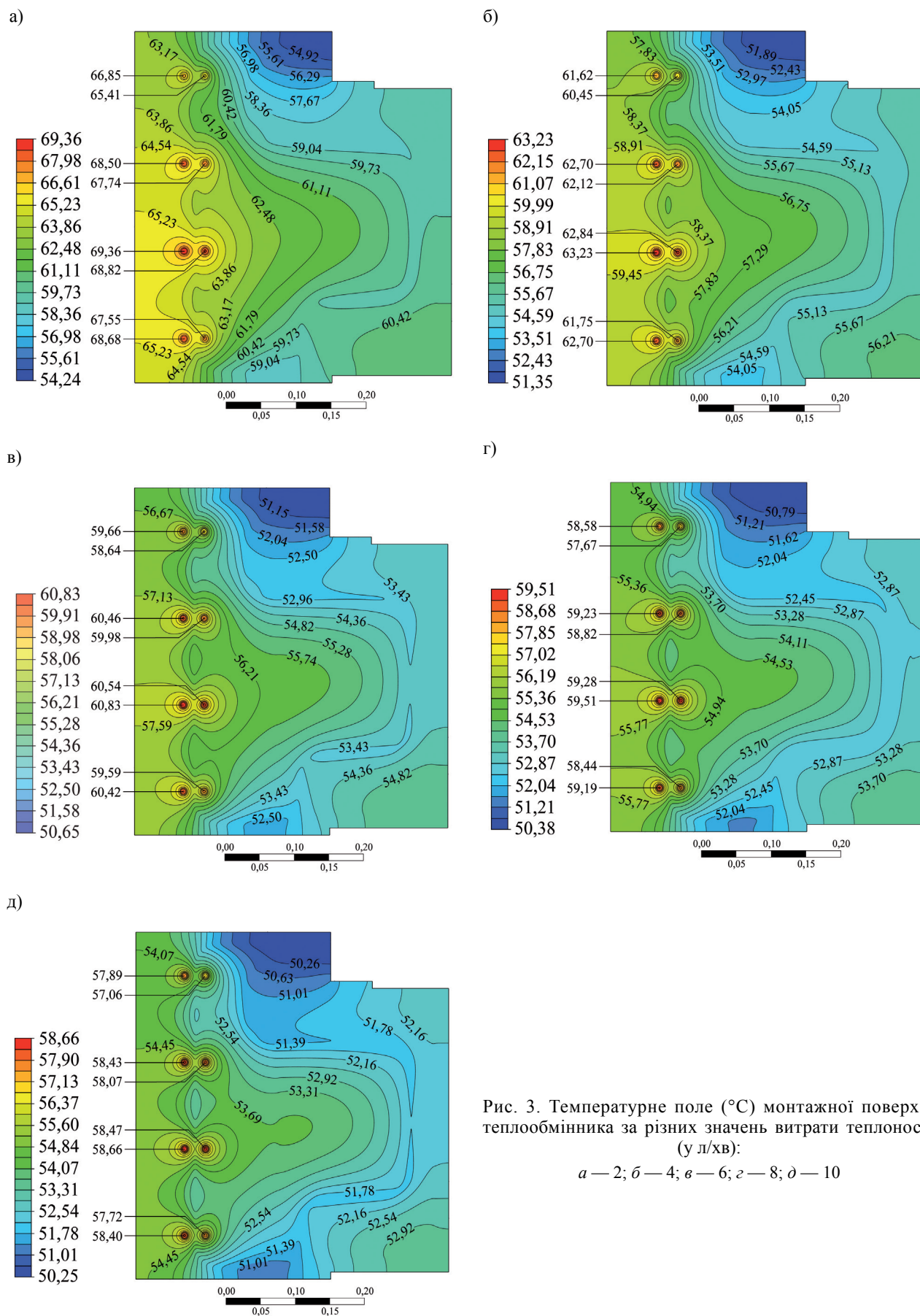


Рис. 3. Температурне поле (°C) монтажної поверхні теплообмінника за різних значень витрати теплоносія (у л/хв):
а — 2; б — 4; в — 6; г — 8; д — 10

Абсолютне (у °C) та відносне (у %) зниження різниці температур Δt_{ij} при збільшенні витрати G теплоносія

Зміна G (у л/хв)	Одиниці виміру Δt_{ij}	Значення Δt_{ij} для джерела теплоти №								
		1	2	3	4	5	6	7	8	17
від 2 до 4	°C	4,96	5,23	5,62	5,80	5,98	6,13	5,80	5,98	5,06
	%	59,4	58,3	58,1	57,8	57,8	57,3	59,0	58,2	60,5
від 2 до 6	°C	6,77	7,19	7,76	8,04	8,28	8,53	7,96	8,26	6,87
	%	81,1	80,3	80,3	79,8	80,0	79,7	81,0	80,4	82,1

ня електронного блоку № 17. Тут видно, що основне зниження температури відбувається в діапазоні збільшення G від 2 до 6 л/хв. Для більш детального та конкретного аналізу у **табл. 2** наведено абсолютні та відносні величини зниження Δt_{ij} температури при збільшенні витрати теплоносія від 2 до 4 л/хв ($j = 1$) та від 2 до 6 л/хв ($j = 2$) для всіх джерел теплоти. (Відносні величини визначено стосовно відповідних значень $\Delta t_{i \max}$.) Ці дані вказують на те, що майже 60% від $\Delta t_{i \max}$, тобто від загального зниження температури при збільшенні витрати G теплоносія від 2 до 10 л/хв, припадає на діапазон від 2 до 4 л/хв ($\Delta t_{i1} = 57,3\text{—}60,5\%$) та до 82% — на діапазон від 2 до 6 л/хв ($\Delta t_{i2} = 79,7\text{—}82,1\%$). Тобто з економічної точки зору, збільшення G понад 6 л/хв не є доцільним, оскільки при цьому можуть суттєво зрости гідравлічні втрати та витрати енергії на прокачування теплоносія.

Таким чином, оптимальною можна вважати витрату теплоносія 4 — 6 л/хв, коли досягається істотне зниження температури поверхні в місцях приєднання тепловиділяючих елементів, а швидкість потоку теплоносія забезпечує прийнятну величину перепаду тиску в охолоджуючому каналі теплообмінника.

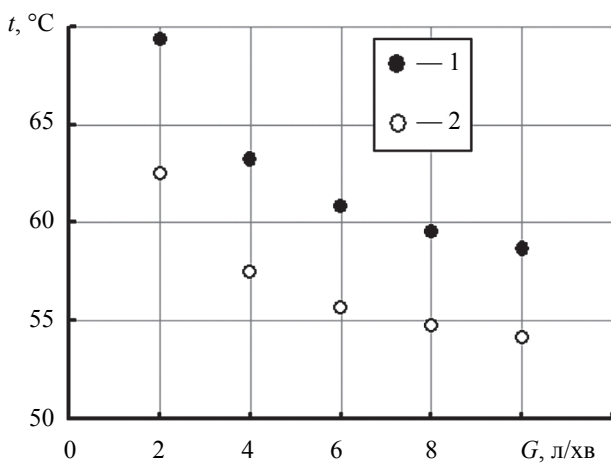


Рис. 4. Залежність максимальної температури поверхні від витрати теплоносія у місцях установки джерел теплоти № 6 (1) та № 17 (2)

Загальний тепловий опір системи охолодження на основі рідинного теплообмінника

Узагальненою тепловою характеристикою системи охолодження на основі рідинного теплообмінника може бути її загальний тепловий опір R . Його визначали розрахунковим шляхом як

$$R = \Delta t_j / P = (t_{ij}^* - t_{\text{вх}}) / P,$$

де t_{ij}^* — середньоарифметичне значення максимальних температур t_i усіх джерел тепловиділення при фіксованій витраті теплоносія G_j ;

$t_{\text{вх}}$ — температура теплоносія на вході ($t_{\text{вх}} = 50^\circ\text{C}$);

P — загальна потужність усіх джерел теплоти в системі ($P = 276$ Вт).

У **табл. 3** наведено необхідні розрахункові характеристики і тепловий опір для 10 значень витрати рідкого теплоносія в охолоджуючому каналі. (Для більш точних розрахунків t_{ij}^* , крім даних, наведених у **табл. 1**, використовувалися також результати з [26].)

Аналіз показує, що загальний тепловий опір системи охолодження знижується в 3,5 рази (від 0,098 до 0,028°C/Вт) при збільшенні витрати теплоносія в 10 разів. Графік на **рис. 5** наочно демонструє, що 80% від загального зниження R припадає на почат-

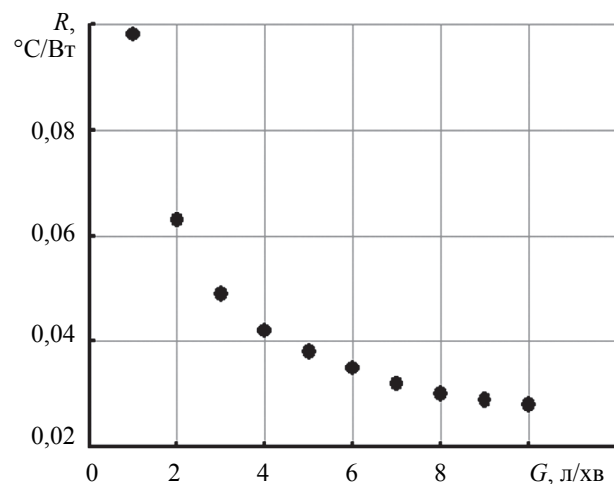


Рис. 5. Залежність теплового опору рідинного теплообмінника від витрати теплоносія

Тепловий опір R системи охолодження з холодною плитою при різних значеннях витрати G_j теплоносія в охолоджуючому каналі

Параметр	Значення параметру при витраті теплоносія G_j , л/хв:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_{ij}^* , °C	76,96	67,27	63,62	61,65	60,40	59,53	58,91	58,38	57,98	57,65
Δ_{ij} , °C	26,96	17,27	13,62	11,65	10,40	9,58	8,91	8,38	7,98	7,65
R , °C/Вт	0,098	0,063	0,049	0,042	0,038	0,035	0,032	0,030	0,029	0,028

кову ділянку збільшення G (від 1 до 4 л/хв), тобто очевидно, що для ефективного охолодження тепловиділяючих джерел при використанні запропонованої конструкції витрата теплоносія має становити не менше 4 л/хв. Разом з тим, підвищення G понад 6 л/хв призводить до відносно незначного (до 10%) зниження теплового опору, тому верхнє обмеження значення витрати теплоносія має визначатися, виходячи з припустимих значень гідравлічних втрат у рідинному тракці.

Висновки

Дослідження показали, що при обраних параметрах рідинного теплообмінника максимальне значення температури в місцях приєднання локальних активних НВЧ-елементів залежить від витрати охолоджуючої рідини, потужності елементів і їхнього розташування по ходу руху теплоносія в охолоджуючому каналі. При всіх значеннях витрати найвищу температуру мають місця приєднання тепловиділяючих елементів № 5 та № 6, найменшу — області, що прилягають до ділянки вхідного й вихідного патрубків. Оптимальним значенням витрати теплоносія в охолоджуючій плиті є 4 — 6 л/хв, коли досягається істотне зниження температури монтажних поверхонь та загального теплового опору системи охолодження.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Guz' V. I., Lipatov V. P., Andrusenko N. I. et al. Multifunctional radar systems. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2007, vol. 50, iss. 1, p. 1–8, <https://doi.org/10.3103/S0735272707010013>
2. Brookner E. Radar and phased array breakthroughs. *Microwave Journal*, 2015, vol. 58, iss. 11, p. 20–36.
3. Борисов О. В., Зубков А. М., Иванов К. А. и др. Широкополосный 70-ваттный GaN усилитель мощности X-диапазона. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*, 2014, вып. 2 (233), с. 4–9.
4. Radar technology advancements and new applications, *Microwave Journal*, 2017, vol. 60, iss. 3, p. 82–96. (Pasternack Enterprises, Inc., Irvine, Calif. Available at: <https://www.pasternack.com/t-Radar-Technology-Advancements-and-New-Applications.aspx>)
5. Herd J.S., Conway M.D. The evolution to modern phased array architectures. *Proc. IEEE*, 2016, vol. 3, iss. 104, p. 519–529, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2494879>
6. Pengelly R.S., Wood S.M., Milligan J.W. et al. A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, vol. 6, iss. 60, p. 1764–1783, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2187535>

7. Choi G.W., Kim H. J., Hwang W. J. et al. High efficiency class-e tuned doherty amplifier using GaN HEMT. *2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, USA, p. 925–928, <https://doi.org/10.1109/mwsym.2009.5165849>

8. Кулиев М. В. Обзор современных GaN транзисторов и направления развития. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*, 2017, вып. 2 (245), с. 18–28.

9. Rathod S., Sreenivasulu K., Beenamole K. S., Ray K. P. Evolutionary trends in transmit/receive module for active phased array radars. *Defence Science Journal*, 2018, vol. 68, iss. 6, p. 553–559, <https://doi.org/10.14429/dsj.68.12628>

10. Савенко В. А. Унификация конструкторских решений для построения приемо-передающих модулей АФАР различных диапазонов. *Всерос. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*, Санкт-Петербург, 2013. Режим доступа: www.mwelectronics.ru/2013/Oral/5/05_Doclad_Savenko-izmenenny%60i%60.pdf

11. Kopp B. A., Billups A. J., Luesse M. H. Thermal analysis and considerations for gallium nitride microwave power amplifier packaging. *Microwave Journal*, 2001, vol. 44, iss. 12, p. 72–82.

12. Тимошенков В.П., Хлыбов А.И., Родионов Д.В. и др. Исследование теплового режима СВЧ усилителей мощности X диапазона. *VIII Всерос. науч.-технич. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2018)*. Россия, Москва, 2018, вып. 3, с. 98–102, <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-3-98-102>

13. Wilson J. Challenges in thermal control of military electronics systems. *Electronics Cooling*, 2003. Available at: <https://www.electronics-cooling.com/2003/02/challenges-in-thermal-control-of-military-electronics-systems/>

14. Wang L., Wang Z., Wang C. et al. Multiobjective optimization method for multichannel microwave components of active phased array antenna. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, vol. 2016, article ID 5398308, 7 p., <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5398308>

15. Scott M., SAMPSON MFR active phased array antenna. *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, 2003, p. 119–123, <https://doi.org/10.1109/past.2003.1256967>

16. Ніколасенко Ю.Є., Баранюк О.В., Рева С.А., Рогачов В.А. CFD-модельовання температурного поля корпусу-радіатора передавального модуля АФАР з повітряним охолодженням. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2019, № 1–2, с. 27–33, <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.1-2.27>

17. Swadish M.S., Sangram K.P. Thermal design and analysis of an air cooled X-band phased array antenna. *11th International Radar Symposium India 2017 (IRSI-17)*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/321965870>

18. Parlak M., Yaban M. Thermal solution of high flux phased radar antenna for military application. *Proceedings of the ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. Vol. 2*. San Francisco, California, USA, 2015, V002T06A008. <https://doi.org/10.1115/ipack2015-48055>

19. Jiawei Ge, Dayuan Jin, Zhiwei Qian. Research on heat dissipation technology of the high-power array antenna. *Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics*,

LNEE, vol. 589. Springer, Singapore, 2020, p. 400–412, https://doi.org/10.1007/978-981-32-9441-7_41

20. Бекишев А. Т., Смоляков А. А., Исаков М. В. и др. Новый подход к решению задачи охлаждения многоканальных теплопередающих модулей АФАР. *Воздушно-космическая сфера*, 2018, №1 (94), с. 65–69, <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2018-94-1-64-69>

21. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. и др. Твердотельный нитрид-галлиевый 500-ваттный импульсный усилитель мощности X-диапазона. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*, 2011, вып. 1 (226), с. 83–88. Режим доступа: http://j.pulsarnpp.ru/images/journal/issues/2011/226_2011/Vasilev_83_88.pdf

22. Ненартович Н. Э., Митяшев М. Б. Из практики разработки активных фазированных антенных решеток. *Вестник МГТУ МИРЭА*, 2014, № 3, с. 173–188. Режим доступа: <https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/333/13-nenartovich.pdf>

23. Трофимов В. Е., Павлов А. Л. Интенсификация теплопередачи в жидкостных теплообменниках с каверна-штыревым ор-

брением. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2016, № 1, с. 23–26, <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.1.23>

24. Трофимов В. Е., Павлов А. Л., Мокроусова Е. А. CFD-моделирование радиатора для воздушного охлаждения микропроцессоров в ограниченном пространстве. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2016, № 6, с. 30–35, <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.6.30>

25. Трофимов В. Е., Павлов А. Л., Сторожук А. С. CFD-моделирование импульсно-струйного радиатора для проведения термотренировки микропроцессоров. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 5–6, с. 30–36, <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.30>

26. Nikolaenko Yu. E., Baranyuk A. V., Reva S. A. et al. Numerical simulation of the thermal and hydraulic characteristics of the liquid heat exchanger of the APAA transmitter-receiver module. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 17, 100499, 11 p., <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100499>

Дата надходження рукопису
до редакції 07.03 2020 р.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.37

УДК 621.396.96; 536.248

Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, А. В. БАРАНИУК, С. А. РЕВА

Украина, г. Киев, Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

E-mail: yunikola@ukr.net

ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО МОДУЛЯ АФАР

Приведены результаты численного моделирования температурного поля жидкостного теплообменника в виде холодной плиты для многоканального приемо-передающего модуля. На каждой стороне холодной плиты симметрично с двух сторон установлено по 8 локальных тепловыделяющих СВЧ-элементов с мощностью тепловыделения каждого 11 Вт и по одному блоку с маломощными электронными элементами общей мощностью всех элементов блока 50 Вт. Суммарная мощность тепловыделения составляет 276 Вт. Охлаждение холодной плиты осуществляется путем прокачки жидкого теплоносителя (Тосол А 65) по изогнутому охлаждающему каналу прямоугольного поперечного сечения, выполненному внутри жидкостного теплообменника. Исследование проведено при значениях расхода жидкого теплоносителя 2, 4, 6, 8 и 10 л/мин. В результате численного моделирования получено распределение температурного поля монтажных поверхностей холодной плиты и определены значения расхода теплоносителя, которые обеспечивают эффективное охлаждение монтажных поверхностей. Показано, что при расходе теплоносителя 4 л/мин значения температуры в местах установки локальных СВЧ-элементов не превышают 64°C. Общее тепловое сопротивление системы охлаждения на основе жидкостного теплообменника составляет от 0,063 до 0,028°C/Вт при расходе жидкого теплоносителя от 2 до 10 л/мин соответственно.

Ключевые слова: CFD-моделирование, жидкостный теплообменник, температурное поле, тепловое сопротивление, приемо-передающий модуль, СВЧ элемент.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.37

UDC 621.396.96; 536.248

Yu. E. NIKOLAENKO, O. V. BARANYUK, S. A. REVA

Ukraine, Kiev, National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»

E-mail: yunikola@ukr.net

THERMAL CHARACTERISTICS OF THE LIQUID HEAT EXCHANGER FOR THE TRANSMITTER/RECEIVER MODULE OF APAA

The paper presents the results on numerical simulation of the temperature field of a cold plate type liquid heat exchanger for a multichannel transmitter/receiver module. Each side of the cold plate carries 8 local microwave fuel elements with a heat dissipation capacity of 11 W each and one block with low-power electronic elements (total power of all elements — 50 W), installed symmetrically on both sides. The total heat dissipation capacity is 276 W. The cold plate is cooled by pumping a liquid heat carrier (Antifreeze A 65) through a curved cooling channel of rectangular cross-section made inside the liquid heat exchanger. The study was conducted at a working fluid flow rate of 2, 4, 6, 8 and 10 l/min. Numerical simulation allowed obtaining the temperature distribution of the mounting surfaces of the cold plate and determining the values of the working fluid flow rate, which provide effective cooling of the mounting surfaces. It is shown that at a flow rate of 4 l/min, the temperature

values at the installation sites of local microwave elements do not exceed 64°C. The total thermal resistance of the cooling system based on a liquid heat exchanger is from 0.063 to 0.028°C/W with a flow rate from 2 to 10 l/min, respectively.

Keywords: CFD modeling, liquid heat exchanger, temperature field, thermal resistance, transmitter/receiver module, microwave element.

REFERENCES

1. Guz' V. I., Lipatov V. P., Andrusenko N. I. et al. Multifunctional radar systems. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2007, vol. 50, iss. 1, pp. 1–8, <https://doi.org/10.3103/S0735272707010013>
2. Brookner E. Radar and phased array breakthroughs. *Microwave Journal*, 2015, vol. 58, iss. 11, pp. 20–36.
3. Borisov O. V., Zubkov A. M., Ivanov K. A. et al. [Broadband 70-watt GaN X-band power amplifier]. *Elektronnaya Tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovyye pribory*, 2014, iss. 2 (233), pp. 4–9 (Rus).
4. Radar technology advancements and new applications. *Microwave Journal*, 2017, vol. 60, iss. 3, pp. 82–96. (Pasternack Enterprises, Inc., Irvine, Calif. Available at: <https://www.pasternack.com/t-Radar-Technology-Advancements-and-New-Applications.aspx>)
5. Herd J.S., Conway M.D. The evolution to modern phased array architectures. *Proc. IEEE*, 2016, vol. 3, iss. 104, pp. 519–529, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2494879>
6. Pengelly R.S., Wood S.M., Milligan J.W. et al. A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, vol. 6, iss. 60, pp. 1764–1783, <https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2187535>
7. Choi G.W., Kim H. J., Hwang W. J. et al. High efficiency class-E tuned doherty amplifier using GaN HEMT. 2009 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, USA, pp. 925–928, <https://doi.org/10.1109/mwsym.2009.5165849>
8. Kuliev M.V. [Overview of modern GaN transistors and directions of development]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovyye pribory*, 2017, iss. 2 (245), pp. 18–28. (Rus)
9. Rathod S., Sreenivasulu K., Beenamole K. S., Ray K. P. Evolutionary trends in transmit/receive module for active phased array radars. *Defence Science Journal*, 2018, vol. 68, iss. 6, pp. 553–559, <https://doi.org/10.14429/dsj.68.12628>
10. Savenko V. A. [Unification of design solutions for the construction of receiving and transmitting modules APAA of various ranges]. *Proc. of All-Russian Conference "Electronics and Microelectronics Microwave"*, St. Petersburg, 2013, 5 p. Available at: www.mwelectronics.ru/2013/Oral/5/05_Doclad_Savenko-izmenennoy%60i%60.pdf (Rus)
11. Kopp B. A., Billups A. J., Luesse M. H. Thermal analysis and considerations for gallium nitride microwave power amplifier packaging. *Microwave Journal*, 2001, vol. 44, iss. 12, pp. 72–82.
12. Timoshenkov V., Khlybov A., Rodionov D. et al. [Thermo researching of X-band micro-wave amplifier]. *VIII All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems"* (MES-2018), Russia, Moscow, 2018, iss. 3, pp. 98–102. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-3-98-102> (Rus)
13. Wilson J. Challenges in thermal control of military electronics systems. *Electronics cooling*, 2003. Available at: <https://www.electronics-cooling.com/2003/02/challenges-in-thermal-control-of-military-electronics-systems/>
14. Wang L., Wang Z., Wang C. et al. Multiobjective optimization method for multichannel microwave components of active phased array antenna. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, vol. 2016, article ID 5398308, 7 p., <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5398308>
15. Scott M., SAMPSON MFR active phased array antenna. *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, 2003, pp. 119–123, <https://doi.org/10.1109/past.2003.1256967>
16. Nikolaenko Yu. E., Baranyuk O. V., Reva S. A., Rohachov V. A. [CFD-modeling of the temperature field of the radiator casing of the transmitting module of the active phased antenna arrays with air cooling]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no. 1–2, pp. 27–33, <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.27> (Ukr)
17. Swadish M.S., Sangram K.P. Thermal design and analysis of an air cooled X-band phased array antenna. *11th International Radar Symposium India 2017 (IRSI-17)*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/321965870>
18. Parlak M., Yaban M. Thermal solution of high flux phased radar antenna for military application. *Proceedings of the ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. Vol. 2*. San Francisco, California, USA, 2015, V002T06A008. <https://doi.org/10.1115/ipack2015-48055>
19. Jiawei Ge, Dayuan Jin, Zhiwei Qian. Research on heat dissipation technology of the high-power array antenna. *Proceedings of the Seventh Asia International Symposium on Mechatronics, LNEE*, vol. 589. Springer, Singapore, 2020, pp. 400–412, https://doi.org/10.1007/978-981-32-9441-7_41
20. Bekishev A. T., Smolyakov A. A., Isakov M. V. et al. [A new approach to cool multichannel SRM in APAR]. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2018, no. 1(94), pp. 65–69, <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2018-94-1-64-69> (Rus)
21. Vasiliev A. G., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. et al. [Solid-state gallium nitride 500-watt pulsed X-band power amplifier]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovyye pribory*, 2011, iss. 1 (226), pp. 83–88. Available at: http://j.pulsarnpp.ru/images/journal/issues/2011/226_2011/Vasilev_83_88.pdf (Rus)
22. Nenartovitch N. E., Mitiachev M. V. [From practice of active phased antenna arrays development]. *Vestnik MGTU MIREA*, 2014, no. 3, iss. 4, pp. 173–188, <https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/333/13-nenartovich.pdf> (Rus)
23. Trofimov V. Ye., Pavlov A. L. [Intensification of heat transfer in liquid heat exchanger with dimple-pin finning]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 1, pp. 23–26, <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.1.23> (Rus)
24. Trofimov V. E., Pavlov A. L., Mokrousova E. A. [CFD-simulation of radiator for air cooling of microprocessors in a limited space]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 6, pp. 30–35, <https://doi.org/10.15222/TKEA2016.6.30> (Rus)
25. Trofimov V. E., Pavlov A. L., Storozhuk A. S. [CFD-simulation of impact jet radiator for thermal testing of microprocessors]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 5–6, pp. 30–36. <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.5-6.30> (Rus)
26. Nikolaenko Yu. E., Baranyuk A. V., Reva S. A. et al. Numerical simulation of the thermal and hydraulic characteristics of the liquid heat exchanger of the APAA transmitter-receiver module. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 17, art. no. 100499, 11 p. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100499>

Опис статті для цитування:

Ніколаєнко Ю. Є., Баранюк О. В., Рева С. А. Теплові характеристики рідинного теплообмінника приймально-передавального модуля АФАР. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2020, № 1–2, с. 37–44. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.37>

Cite the article as:

Nikolaenko Yu. E., Baranyuk O. V., Reva S. A. Thermal characteristics of the liquid heat exchanger for the transmitter/receiver module of APAA. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 1–2, pp. 37–44. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.37>

Ph. D. V. N. LITVINENKO¹, Ph. D. Ye. A. BAGANOV¹, Dr. Sc. I. M. VIKULIN²,
Ph. D. V. E. GORBACHEV²

Ukraine, ¹Kherson National Technical University;

²Odessa National Academy of Telecommunications named after A. S. Popov

E-mail: hersonlvn@gmail.com

INFLUENCE OF GETTERING ON ALUMINUM OHMIC CONTACT FORMATION

The study considers the reasons and mechanisms of degradation of reverse characteristics of varicaps with aluminum-based ohmic contacts. The authors present and analyze the experimental results on how gettering affects the reverse current of varicaps, as well as possible mechanisms of such effect. Gettering was performed with a getter site created on the back side of the substrate before the epitaxial layer is deposited on the working side of the substrate. The article demonstrates that the proposed technology using gettering is rather effective in reducing the level of reverse currents and in increasing the yield of devices.

Keywords: aluminum, ohmic contact, gettering, varicap, defects, reverse current.

Varicaps are widely used in radio electronics as a variable capacitance, the value of which is controlled by voltage [1—4]. The weak point in the production process of varicaps is formation of ohmic contacts, which are usually made of nickel or aluminum. The diffusion coefficient of nickel atoms in silicon is several orders higher than that of dopant atoms, such as boron and phosphorus. That is why if structural defects are contained in silicon then nickel easily penetrates the space charge area of the p - n junction during annealing of a nickel film after its deposition on the surface of a varicap structure during the ohmic contact formation. This results in increasing of the level of reverse varicap current [5]. Aluminum has high electrical conductivity, it is cheap and plastic (i.e. it tolerates thermal cycling well). This metal is easily sputtered, well etched and provides high resolution at photolithography. Moreover, aluminum is suitable for use in radiation-resistant devices. However, as practice has shown, when an aluminum-based ohmic contact is used, the reverse branch of the current-voltage characteristic (CVC) of the varicap may degrade. It was found [6, 7] that the cause of frequent failures of semiconductor devices with aluminum metallization is the aluminum spikes, which shunt p - n junctions. These spikes appear during heat treatment stage after deposition of the aluminum film. Selective removal of the aluminum film from the substrate surface in the contact window area after heat treatment at 470°C for 30 minutes reveals that the morphological perfection

of the Al-Si interface boundary deteriorates catastrophically due to the appearance of deep voids in silicon. The authors of [7] assert that the appearance of spikes in p - n junctions is connected with these voids, which are formed as a result of inhomogeneous dissolution of silicon in aluminum (Fig. 1). The voids are filled up by aluminum with dissolved silicon and can short-circuit p - n junctions.

The penetration depth of aluminum spikes into the silicon, which is estimated by the depth of the voids in the local places of the contact area, practically does not change in the range of 300—500°C and is about 40—90 nm [6]. In the temperature range of 500—577°C there is a sharp increase in the penetration depth up to 1.25—1.45 μ m.

In [6] an assumption was made that the inhomogeneous dissolution of silicon and the filling of the voids by aluminum, as well as the drastic increase in the depth of penetration of aluminum into the silicon in the temperature range of 500—577°C were caused by the appearance of a liquid phase, which «melts» silicon, although the heat treatment temperature was lower than the melting point of the eutectic. The authors of [6] proposed to prevent the active interaction of aluminum with silicon

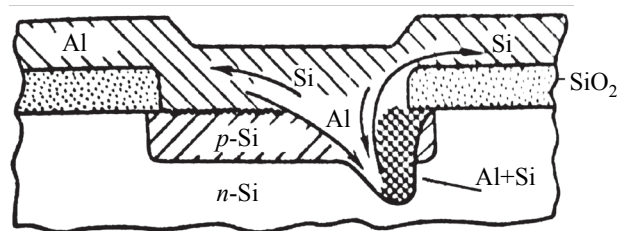


Fig. 1. Schematic drawing of aluminum film dissolving silicon [7]

A short version of this article was presented at the 10th International Scientific and Technical Conference «Theoretical and practical problems at the processing of materials by pressure and quality of professional education», Kyiv – Kherson, 2019 [18].

in the process of heat treatment by rapid annealing of the aluminum film after its deposition on the surface of the varicap structure. At such annealing, the temperature is high enough to form a liquid phase, but the duration is too small to cause intensive dissolution of silicon in aluminum and void formation. The disadvantage of such approach is pointed out by the authors [6] themselves. It is caused by the heat treatments required at subsequent process operations, which are not connected with metallization and can result in melting. For example, some operations of assembling crystals into housings can be performed at the temperatures over 510°C.

Another approach to the solution of the problem of Al-Si interaction was considered in [6, 7]. Its idea lies in the additional doping of the aluminum film with silicon to concentrations within the range of existence of the solid solution (0.5—1.0 mass %). This method can slightly reduce the intensity of the Al-Si interaction without eliminating the interaction itself. As a result, increasing the temperature at subsequent stages of technological process can cause nonequilibrium mass transfer and increase the depth of penetration of aluminum into silicon. Moreover, this method cannot provide equilibrium with local peculiarities of the crystal, such as defects, and thus cannot eliminate aluminum migration along them.

Thus, the cause of the inhomogeneous dissolution of silicon in aluminum is not completely identified. The ways to prevent deep penetration of aluminum into silicon during annealing of aluminum metallization proposed in [6, 7] are not optimal for solving this problem.

The aim of this work is to investigate the cause of local deep penetration of aluminum into the p - n junction area of the varicap during the annealing of aluminum metallization and to develop an effective technological method preventing this phenomenon, which, when used, will allow increasing the device yield.

Test samples

The structures of the investigated varicaps were produced using the standard planar-epitaxial technology [8, 9]. The epitaxial process was performed using the silicon substrates doped with antimony with specific resistance of 0.01 $\Omega \cdot \text{cm}$ and oriented along the (111) plane. Epitaxial layers were grown by the chloride epitaxy. The temperature of the epitaxial process was 1150°C. Obtained epitaxial structures had a specific resistance of 1.3 $\Omega \cdot \text{cm}$ and a thickness of 7 μm . The following

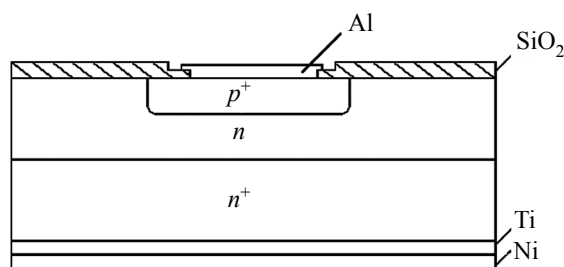


Fig. 2. Schematic drawing of varicap structure

operations with varicap structures were carried out in accordance with the standard technological process [8, 9]. The ohmic contacts on the working side of the varicap structures were formed thus: first, an aluminum film was deposited in vacuum, followed by photolithography on the aluminum layer and annealing of the contact in an inert medium at 560°C for 14 minutes.

Implementing the above operations resulted in obtaining the varicap structure shown in Fig. 2.

Studying structural defects

In order to discover what causes the degradation of the reverse characteristics of varicaps during heat treatment of varicap structures with metallic film formed by photolithography, metallographic studies were conducted on the varicap structures rejected during the control of their reverse current level.

The Sirtl etch was used to detect structural defects. The duration of selective etching was in the range from 10 seconds to 20 minutes. The types of structural defects were determined and their density assessed using a METAM -1 metallographic microscope.

The density of defects was determined by the formula

$$N = n/S,$$

where N is the defect density;

n is the average value of the number of defects in five areas;

S is the area of the field of view in the eyepiece of the microscope.

Initial epitaxial structures before the first high-temperature operation (thermal oxidation) were investigated for defects. Selective treatment with Sirtl etch showed (Fig. 3) the presence of epitaxial stacking faults with the

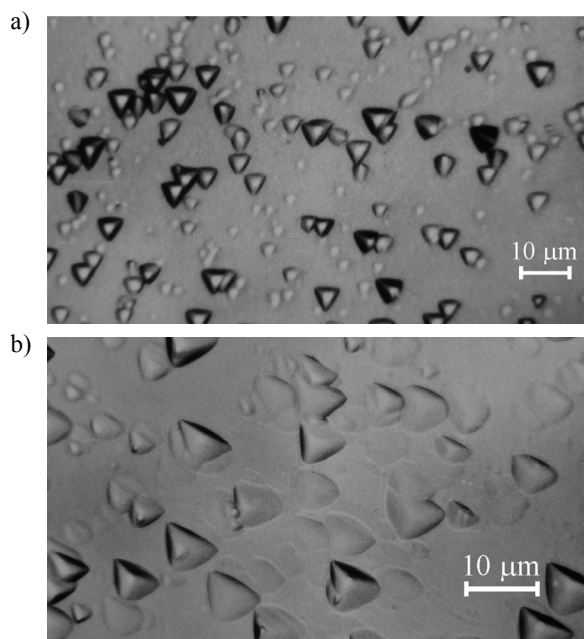


Fig. 3. Surface of silicon epitaxial structure with stacking faults (a) and dislocations (b) revealed after treatment in Sirtl etch

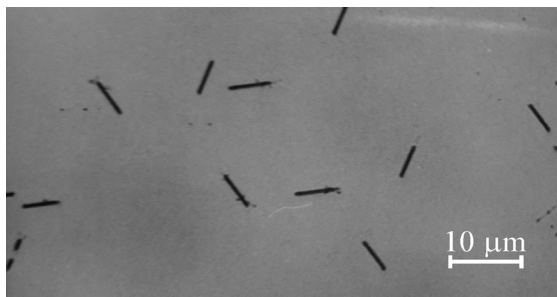


Fig. 4. A micrograph of the surface of the epitaxial structure after thermal oxidation and selective etching

density of 10^4 — 10^5 cm^{-2} (etching time 1.5 minutes) and dislocations with the density of 10^3 — 10^4 cm^{-2} (etching time 2 min).

After thermal oxidation and removal of the SiO_2 layer, the structures were treated with Sirtl etch for 20 seconds, which revealed oxidation stacking faults with the density of up to 10^5 cm^{-2} (Fig. 4).

The authors believe that the revealed structural defects cause an increase in the boundary solubility of aluminum at the temperature of aluminum film annealing (carried out after film deposition on the varicap structure surface followed by photolithography) and an increase in the aluminum diffusion coefficient in silicon along the defects. These two effects lead to a local penetration of aluminum into the p – n junction region of the varicap, which may cause degradation of the reverse characteristics of the varicap.

This assumption is confirmed by the authors of [10], who studied the processes of formation and directed migration of molten metal-semiconductor zones in single crystalline silicon at the presence of a dislocation density gradient field. It was ascertained that the molten zones in the matrix volume appear during annealing due to formation of alloys of impurities of a metal film (i.e. aluminum) with a single crystal at the metal-semiconductor interface boundary. According to the authors of [10], the impurity motion in the volume of a semiconductor was realized in the form of molten inclusions due to the difference of chemical potentials of atoms at the “back” and “frontal” boundaries of inclusion.

Gettering technology

In order to prevent the formation of structural defects, it was necessary to choose an effective method of gettering [11—17]. Since structural defects start to form from the epitaxy process, it is obvious that the getter site has to be created in the substrates before depositing the epitaxial layers. Studies have shown that the most effective way to prevent the formation of structural defects in the epitaxial layers is to create a getter site on the back side of the substrate by implanting it with phosphorus ions. The getter site was formed on the back side of the substrate by implantation of phosphorus ions with an energy of

100 keV and a dose of $8 \cdot 10^{15}$ cm^{-2} using an industrial ion doping system “Везувий-5” (Vesuvius-5). Next, the epitaxial layer was deposited on the working side of the substrate at $T = 1150^\circ\text{C}$ by the chloride method using a “УНЭС-2П-КА” (UNES-2P-KA) system. Epitaxial structures were produced according to the technological process given above.

Testing the effectiveness of the developed technology

For the research, two experimental batches of varicap structures were formed, each of them divided into two equal parts. One half of the structures in each batch were manufactured using basic technology (no. 1-b, no. 2-b), the other half had a gettering stage (no. 1-g, no. 2-g). The efficiency of the developed technology was evaluated by the yield of varicap structures. The quality of structures was defined based on the results of metallographic studies and by the value of the reverse current I_{rev} .

The validity criterion was set at $I_{rev} \leq 0.5$ μA for 30 V reverse voltage. Results of the control over the reverse current validity criterion of the varicap structures manufactured by the basic and developed technologies are given in Table. Comparison shows that the use of gettering increases the varicap structures yield by an average of 10.7%. The reverse current levels of the structures manufactured using gettering were 4 to 5 times lower than the ones manufactured by basic technology.

The metallographic studies of the varicap structures manufactured with gettering were carried out after boron redistribution and showed the surfaces to be free of the structural defects that affect the interdiffusion of aluminum and silicon (Fig. 5).

Yield of varicap structures produced by the basic and the newly-developed technologies based on reverse current control

Manufacturing technology	Batch number	Structures yield, %
Basic	1-b	84.8
	2-b	82.9
Using gettering	1-g	93.8
	2-g	95.3

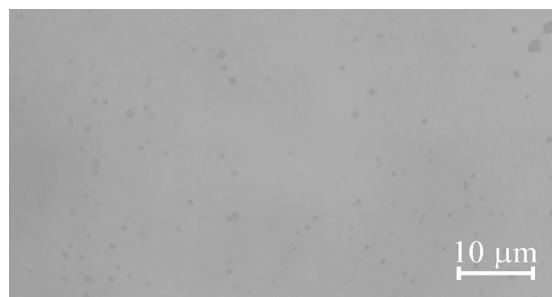


Fig. 5. Surface of the varicap structure manufactured using gettering after boron redistribution

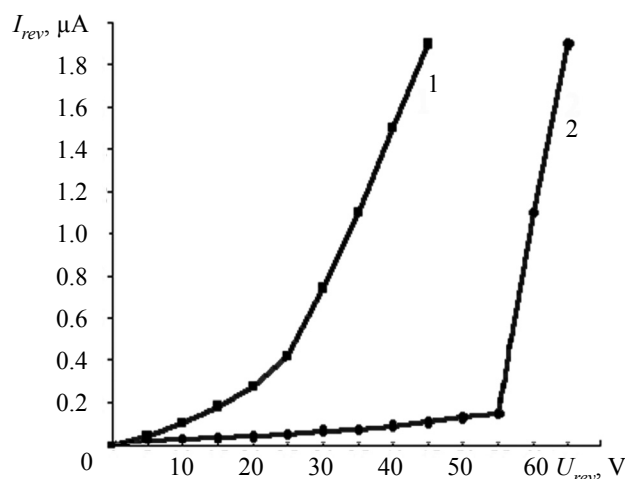


Fig. 6. Reverse CVC of varicap structures:

1 — varicap structure manufactured by the basic technology;
2 — varicap structure manufactured using gettering

Fig. 6 shows the averaged reverse branches of the CVC of varicap structures manufactured by basic technology and using gettering. As can be seen from Fig. 6, the varicap structure manufactured with gettering has a CVC (curve 2), which is typical for a silicon diode at the absence of structural defects and undesirable impurities in its active regions. The varicap structure manufactured by basic technology, on the other hand, has a so-called “soft” CVC (curve 1), which indicates the presence of structural defects (stacking faults, dislocations) and metal impurities in the active areas of the varicap or the presence of an aluminum spike, penetrating deeply into area of space charge of p^+-n junction.

Comparison of curves 1 and 2 shows that the varicap structure manufactured by the basic technology (curve 1) has a much higher level of reverse currents compared to the varicap structure manufactured using gettering (curve 2).

The influence of the getter site, which was created on the back side of the substrate before the epitaxial layer was deposited on its working side, on the varicap parameters can be explained as follows. During epitaxy, which is carried out at the temperature of 1150°C, dislocations of high density are formed on the back side of the substrate. These disruptions of crystal structure lead to diffusion of the defects nuclei, such as substitutional impurities, interstitial atoms, and vacancies in the field of elastic stresses to the broken layer, which absorbs them. This makes it possible to prevent the formation of stacking faults and dislocations in the epitaxial layer during its growth. Apart from that, at the high-temperature operations, such as thermal oxidation and boron injection and redistribution, the getter site created on the back side of the plate, absorbs both uncontrolled impurities and nucleation centers of stacking faults from the volume and surface region of the substrate, preventing formation of defects. Elimination of structural defects in active varicap

regions excludes local penetration of aluminum into the $p-n$ junction due to both increasing of the aluminum solubility in silicon at the temperature of aluminum film annealing and absence of structural defects, which accelerate a diffusion of aluminum into silicon.

Conclusion

Thus, the low yield of varicap structures, which is associated with the local penetration of aluminum into the $p-n$ junction region, is connected with structural defects (epitaxial and oxidative stacking faults and dislocations), which are formed during high-temperature technology operations. Application of the developed technology for the manufacturing of varicap structures using gettering with a getter site created on the back side of the plate before depositing the epitaxial layer on its working side, allows removing the nucleation centers of defects and unwanted impurities from the active regions of the varicaps. It prevents the formation of structural defects in them and occurrence of the phenomenon of local aluminum penetration into the $p-n$ junction region, which significantly decreases the reverse currents of the varicaps and increases yield of devices.

REFERENCES

1. Timoshenkov S. P., Boyko A. N., Gaev D. S., Kalmykov R. M. [Integrated high-capacity varicap based on porous silicon]. *Izvestiya vuzov. Elektronika*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 15–19. (Rus)
2. Vikulin I. M., Stafeev V. I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Physics of semiconductor devices]. Moscow, Radio i Svyaz', 1990, 264 p. (Rus)
3. Savchenko M. P., Starovoitova O. V. [Negative feedback circuit by noise for an autogenerator with varicaps]. *IKBFU's Vestnik. Ser.: Physics, mathematics, and technology*, 2016, no. 2, pp. 66–69. (Rus)
4. Spiridonov A. B., Litsoev S. V., Petruchuk I. I. [Development of an MIS varicap with charge transfer in the microwave range]. *Prikladnaya fizika*, 2016, no. 3, pp. 75–80. (Rus)
5. Litvinenko V. N., Bohach N. V. [Defects and impurities in silicon and their gettering methods]. *Visnyk KhNTU*, 2017, no. 1(60), pp. 32–42. (Rus)
6. Gromov D. G., Mochalov A. I., Sulimin A. D., Shevyakov V. I. *Metallizatsiya ul'trabort'shikh integral'nykh skhem* [Metallization of ultra-large integrated circuits]. Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2015, 280 p. (Rus)
7. Dzh. Pouta, K. Tu, Dzh. Meyyera et al. (eds.) *Tonkiye plenki. Vzaimnaya diffuziya i reaktsii* [Thin films. Mutual diffusion and reactions]. Moscow, Mir, 1982, 576 p. (Rus)
8. Lytvynenko V. M. *Fizyka ta tekhnolohiya napivprovidnykovykh diodiv* [Physics and technology of semiconductor diodes]. Kherson, FOP Vyshemyr's'ky V.S., 2018, 184 p. (Ukr)
9. Kurnosov A. I., Yudin V. V. *Tekhnologiya proizvodstva poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem* [Fabrication technology of semiconductor devices and integrated circuits]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1986, 368 p. (Rus)
10. Skvortsov A. A., Koryachko M. V. [Migration of molten Al-Si inclusions in the field of silicon structural inhomogeneity]. *Abstracts of the International Symposium “Crystal Physics 2013”*, Moscow, Inst. Steel and Alloys, 2013, pp. 207–209. (Rus)
11. Pilipenko V. A., Gorushko V. A., Petlitskiy A. N. et al. [Methods and mechanisms of gettering of silicon structures in the production of integrated circuits]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no. 2–3, pp. 43–57. (Rus)
12. Klimanov E. A. [Mechanism of gettering the generation-recombination centers in silicon at diffusion of phosphorus and boron].

Uspekhi Prikladnoi Fiziki (Advances in Applied Physics), 2015, vol.3, no. 2, pp. 121–125. (Rus)

13. Vikulin I. M., Litvinenko V. N., Shutov S. V. et al. Enhancing parameters of silicon varactors using laser gettering. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 29–32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.29>

14. Grafutin V. I., Prokop'ev E. P., Timoshenkov S. P. Gettering and synergetic approaches to the problem of silicon and silicon-based materials: Review. *Nanotechnology Research and Practice*, 2014, vol.1, no. 1, pp. 4–26.

15. Litvinenko V. N., Vikulin I. M., Gorbachev V. E. Improvement of the reverse characteristics of schottky diodes using gettering. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2019, no.1–2, pp. 34–39. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.34>

16. Sadovskiy P. K., Chelyadinskiy A. R., Odzhayev V. B. et al. [Getter creation in silicon by implanting of antimony ions]. *Semiconductors/Physics of the Solid State*, 2013, vol. 55, iss. 6, pp.1071–1073. (Rus)

17. Bokhan Yu. I., Kamenkov V. S., Tolochko N. K. Dominant factors of the laser gettering of silicon wafers. *Semiconductors*, 2015, vol.49, iss. 2, pp.270–273. <https://doi.org/10.1134/S1063782615020050>

18. Lytvynenko V. M., Bahanov Ye. O., Vikulin I. M. et al. [Optimization of silicon varicap manufacturing technology with ohmic contact based on aluminum]. *Proc. of the X Int. Sc. Tekhn. Conf. «Teoretychni ta praktychni problemy v obrobtsi materialiv tyskom i yakosti fakhovoyi osvity»*, 2019, Kyiv – Kherson. pp. 104–106. (Ukr).

Received 20.01 2020

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.45

УДК 621.382

В. М. ЛИТВИНЕНКО¹, Є. О. БАГАНОВ¹,
І. М. ВІКУЛІН², В. Е. ГОРБАЧОВ²

Україна, ¹Херсонський національний технічний університет

²Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

E-mail: hersonlvn@gmail.com

ВПЛИВ ГЕТЕРУВАННЯ НА ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО ОМІЧНОГО КОНТАКТУ

Варикапи широко використовуються в радіoeлектроніці як змінна ємність, величина якої керується напругою. Однак слід зазначити, що вартість варикапів залишається порівняно високою. Це викликано низьким виходом придатних приладів внаслідок високого рівня зворотних струмів і низьких пробивних напруг варикапів, що пов'язано з істотною залежністю їхніх зворотних характеристик від щільності структурних дефектів і сторонніх домішок у структурах варикапів.

Роботу присвячено з'ясуванню причин та механізмів деградації зворотних характеристик варикапів з омічним контактом на основі алюмінію в процесі відпау плівки алюмінію під час формування омічного контакту, а також визначенню можливості застосування операцій гетерування для запобігання деградації зворотних характеристик варикапів і підвищення виходу придатних приладів.

Встановлено, що причиною деградації зворотних характеристик варикапів з омічним контактом на основі алюмінію є структурні дефекти, що утворюються в активних областях варикапів у процесі проведення високотемпературних технологічних операцій.

Докладно розглянуто запропоновану технологію виготовлення структур варикапів з омічним контактом на основі алюмінію із застосуванням гетерування областю гетера, створеною на зворотній стороні пластини перед осадженням на її робочу сторону епітаксійного шару. Розглянуто причини та механізми деградації зворотних характеристик варикапів з омічним контактом на основі алюмінію в процесі відпау плівки алюмінію під час формування омічного контакту.

Показано, що розроблена технологія виготовлення структур варикапів із застосуванням гетерування дозволяє очистити активні області варикапів від зародків дефектів та небажаних домішок і запобігти утворенню в них структурних дефектів, що унеможливило локальне проникнення алюмінію в область р–п-переходу та забезпечує суттєве зниження рівня зворотних струмів варикапів і підвищення виходу придатних приладів.

Ключові слова: алюміній, омічний контакт, гетерування, варикап, дефекти, зворотний струм.

DOI: 10.15222/TKEA2020.1-2.45

UDC 621.382

В. Н. ЛИТВИНЕНКО¹, Е. А. БАГАНОВ¹,
И. М. ВИКУЛИН², В. Э. ГОРБАЧЕВ²

Украина, ¹Херсонский национальный технический университет

²Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

E-mail: hersonlvn@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ГЕТТЕРИРОВАНИЯ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ОМИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Варикапы широко используются в радиоэлектронике в качестве переменной емкости, величина которой управляется напряжением. Однако следует отметить, что стоимость варикапов остается сравнительно высокой, что связано с низким выходом годных приборов. Это объясняется высоким уровнем обратных токов и низкими пробивными

напряжениями варикапов, что связано с существенной зависимостью их обратных характеристик от плотности структурных дефектов и посторонних примесей в структурах варикапов.

Работа посвящена выяснению причин и механизмов деградации обратных характеристик варикапов с омическим контактом на основе алюминия в процессе отжига пленки алюминия при формировании омического контакта, а также определения возможности применения операций геттерирования для предотвращения деградации обратных характеристик и повышение выхода годных приборов.

Установлено, что причиной деградации обратных характеристик варикапов с омическим контактом на основе алюминия являются структурные дефекты, образующиеся в активных областях варикапов в процессе проведения высокотемпературных технологических операций.

Подробно рассмотрена предложенная технология изготовления структур варикапов с применением геттерирования с помощью области геттера, созданного на обратной стороне пластины перед осаждением на ее рабочую сторону эпитаксиального слоя. Рассмотрены причины и механизмы деградации обратных характеристик варикапов с омическим контактом на основе алюминия в процессе отжига пленки алюминия при формировании омического контакта.

Показано, что разработанная технология изготовления структур варикапов с применением геттерирования позволяет очистить активные области варикапов от зародышей дефектов и нежелательных примесей и предотвратить образование в них структурных дефектов, что делает невозможным явление локального проникновения алюминия в область $p-n$ -перехода и обеспечивает существенное снижение уровня обратных токов варикапов и повышение выхода годных приборов.

Ключевые слова: алюминий, омический контакт, геттерирование, варикап, дефекты, обратный ток.

Опис статті для цитування:

Литвиненко В. М., Баганов Є. О., Вікулін І. М., Горбачов В. Е. Вплив гетерування на процес формування алюмінієвого омичного контакту. Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2020, № 1–2, с. 45–50. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.45>

Cite the article as:

Litvinenko V. N., Baganov Ye. A., Vikulin I. M., Gorbachev V. E. Influence of gettering on aluminum ohmic contact formation. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature, 2020, no. 1–2, pp. 45–50. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.45>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Должиков Володимир Васильович, докт. фіз.-мат. наук, зав. кафедрою, Харківський національний університет радіоелектроніки

Ніколаєнко Юрій Єгорович, докт. техн. наук, провідний науковий співробітник, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського»

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

Тартачник Володимир Петрович, докт. фіз.-мат. наук, провідний наук. співробітник, Інститут ядерних досліджень НАН України, м. Київ

Тининіка Олександр Миколайович, канд. техн. наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет

Трофімов Володимир Євгенійович, канд. техн. наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет

ПОКАЖЧИК СТАТЕЙ, ОПУБЛІКОВАНИХ У ЖУРНАЛІ В 2019 р.

Нові компоненти для електронної апаратури

Деформаційно-стимульовані ефекти в мікроструктурах антимоніду індію за криогенних температур для сенсорних застосувань. *Дружинін А. О., Ховерко Ю. М., Островський І. П., Лях-Кагуї Н. С., Пасинкова О. А.* (3) EN

3–4

Сучасні електронні технології

Контролепридатність схем в FPGA-проектах за ознакою розсіюваної потужності. *Антонюк В. В., Дрозд О. В., Дрозд Ю. В., Степова Г. С.* (3) RU

1–2

Електронні засоби: дослідження, розробки

Конструкторські методи зменшення шумів і завад у каналах із зосередженими параметрами при високошвидкісній обробці даних. *Тининика О. М.* (10) RU

1–2

Зменшення шумів і завад шляхом раціонального вибору електронних компонентів в каналах з зосередженими параметрами при високошвидкісній обробці даних. *Тининика О. М.* (10) RU

3–4

Вимірювальна система для тестування електричних параметрів ПЗЗЕМ різного формату. *Забудський В. В., Голєнков О. Г., Рихальський О. В., Рева В. П., Корінець С. В., Духнін С. Є., Митяй Р. І.* (3) EN

5–6

Дослідження можливостей компенсації ефекта блумінга ПЗЗ-детекторів оптичного спектру. *Єгоров А. Д., Єгоров В. А., Єгоров С. А., Сінельников І. Є.* (8) UA

5–6

НВЧ-техніка

Мікросмужкові подвоювачі НВЧ з нетрадиційною реалізацією. *Глушеченко Е. М.* (20) RU

1–2

Врахування взаємного впливу окремих мікросмужкових елементів на параметри антенних решіток. *Rao K. Prahada, Vani R. M., Hunagund P. V.* (16) EN

5–6

Енергетична електроніка

Зміни характеристик кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячних батарей після струмових перевантажень. *Іванченко О. В., Тонкошкур О. С.* (19) RU

3–4

Сенсоелектроніка

Високотемпературні сенсори деформації на основі ниткоподібних кристалів фосфі-

ду галію. *Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П.* (26) UA

3–4

Забезпечення теплових режимів

CFD-моделювання температурного поля корпусу-радіатора передавального модуля АФАР з повітряним охолодженням. *Ніколаєнко Ю. Є., Баранюк О. В., Рева С. А., Рогачов В. А.* (27) UA

1–2

Синтез структури вирішувача системи математичного моделювання OpenFOAM для аналізу теплового режиму світлодіодного світильника. *Собянін І. В., Трофімов В. Є.* (25) RU

5–6

Нова конструкція світлодіодного світильника з тепловими трубами. *Пекур Д. В., Ніколаєнко Ю. Є., Сорокін В. М.* (34) UA

5–6

Технологічні процеси та обладнання

Поліпшення зворотних характеристик діода Шотткі при використанні гетерування. *Литвиненко В. М., Вікулін І. М., Горбачов В. Е.* (34) EN

1–2

Узгодження параметрів зварювальних імпульсів з програмою тиску електродів та електрофізичними процесами в зварювальному контакті. *Бондаренко О. Ф.* (51) UA

5–6

Матеріали електроніки

Гнучкі композиційні сцинтилятори на основі мікро- та нанопорошків $ZnWO_4$. *Тінкова В. С., Якубовська Г. Г., Тупіцина І. А., Абашин С. Л., Пузан Г. Н., Третьяк С. О.* (40) EN

1–2

Поверхневі шари $ZnSe:Ca$ з дірковою провідністю. *Махній В. П., Березовський М. М., Кінзерська О. В., Мельник В. В.* (31) EN

3–4

Вплив домішок і структурних дефектів на електрофізичні та детекторні властивості $CdTe$ та $CdZnTe$. *Кондрік О. І., Ковтун Г. П.* (43) RU

5–6

Метрологія. Стандартизація

Високоінформативний комплексний метод визначення типу моторного мастила. *Мамикін А. В., Кукла О. Л., Матвієнко Л. М., Дорожінська Г. В., Маслов В. П., Дорожінський Г. В.* (36) RU

3–4

Бібліографія

Покажчик статей, опублікованих у журналі в 2018 р.

1–2

INDEX OF ARTICLES PUBLISHED

IN THE JOURNAL IN 2019

New components for electronic equipment

Deformation-induced effects in indium antimonide microstructures at cryogenic temperatures for sensor applications. *Druzhinin A. O., Khoverko Yu. M., Ostrovskii I. P., Liakh-Kaguy N. S., Pasyukova O. A.* (3) EN

3–4

Modern electronic technologies

Checkability of the circuits in FPGA designs according to power dissipation. *Antoniuk V. V., Drozd A. V., Drozd J. V., Stepova H. S.* (3) RU

1–2

Electronic devices: research, development

Design methods for reducing noise and interferences in channels with lumped parameters in high-speed data processing. *Tynynyka A. N.* (10) RU

1–2

Reduction of noise and interference by rational selection of electronic components in lumped parameter channels at high speed data processing. *Tynynyka A. N.* (10) RU

3–4

Measuring system for testing electrical parameters of EMCCDs of various formats. *Zabudsky V., Golenkov O., Rikhsalsky O., Reva V., Korinets S., Dukhnin S., Mytiai R.* (3) EN

5–6

Investigation of the possibility to compensate for the blooming effect in CCD optical spectral sensors. *Yegorov A. D., Yegorov V. A., Yegorov S. A., Sinelnikov I. E.* (8) UA

5–6

Microwave engineering

Microstrip doubler microwave with non-traditional implementation. *Glushechenko E. N.* (20) RU

1–2

Mitigation of mutual coupling in microstrip antenna arrays. *Rao K. Prahlada, Vani R. M., Hunagund P. V.* (16) EN

5–6

Power electronics

Application of resettable elements for electrical Changes in the characteristics of silicon photovoltaic cells of solar arrays after current overloads. *Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S.* (19) RU

3–4

Sensors

High temperature strain sensors based on gallium phosphide whiskers. *Druzhinin A. O., Maryamova I. I., Kuttrakov O. P.* (26) UA

3–4

Thermal management

CFD-modeling of the temperature field of the radiator casing of the transmitting module of the active phased antenna arrays with air cooling. *Nikolaenko Yu. E., Baranyuk A. V., Reva S. A., Rohachov V. A.* (27) UA

1–2

Synthesising solver structure of the OpenFOAM mathematical modeling system for analysing thermal mode of LED lamps. *Sobianin I. V., Trofimov V. E.* (25) RU

5–6

New LED lamp design with heat pipes. *Pekur D. V., Nikolaenko Yu. E., Sorokin V. M.* (34) UA

5–6

Production technology and equipment

Improvement of the reverse characteristics of Schottky diodes using gettering. *Litvinenko V. N., Vikulin I. M., Gorbachev V. E.* (34) EN

1–2

Coordination of welding pulse parameters with electrode pressure program and electrophysical processes in welding contact. *Bondarenko O. F.* (51) UA

5–6

Materials of electronics

Flexible composite scintillators based on ZnWO₄ micro- and nanopowders. *Tinkova V. S., Yakubovskaya A. G., Tupitsyna I. A., Abashin S. L., Puzan A. N., Tretyak S. O.* (40) EN

1–2

Surface ZnSe:Ca layers with hole conductivity. *Makhniy V. P., Berezovskiy M. M., Kinzerska O. V., Melnyk V. V.* (31) EN

3–4

Influence of impurities and structural defects on electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnTe. *Kondrik A. I., Kovtun G. P.* (43) RU

5–6

Metrology, standardization

Highly informative integrated method for determining the type of engine oil. *Mamykin A. V., Kukla A. L., Matvienko L. M., Dorozinska H. V., Maslov V. P., Dorozinsky G. V.* (36) RU

3–4

Bibliography

Index of articles published in the journal in 2018

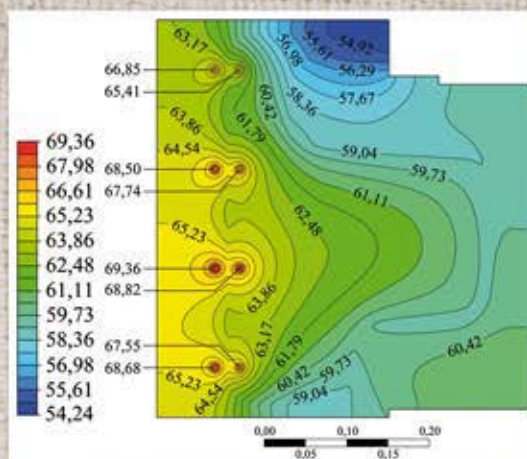
1–2

До статті
«Теплові характеристики рідинного
теплообмінника приймально-
передавального модуля АФАР»

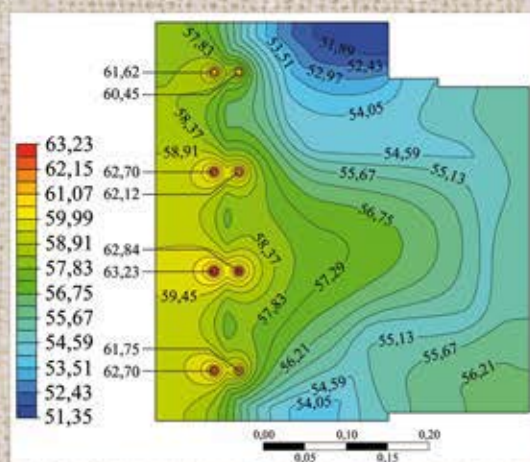
Рис. 3. Температурне поле (°C) монтажної
поверхні теплообмінника за різних значень
витрати теплоносія (у л/хв):

а — 2; б — 4; в — 6; г — 8; д — 10

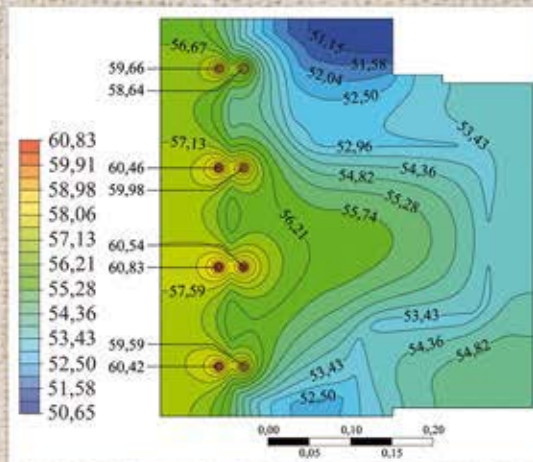
а)



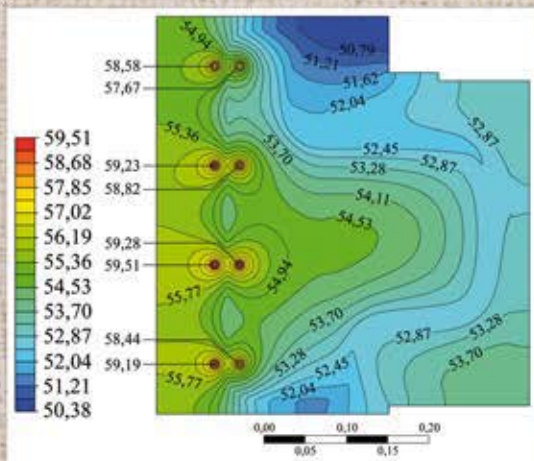
б)



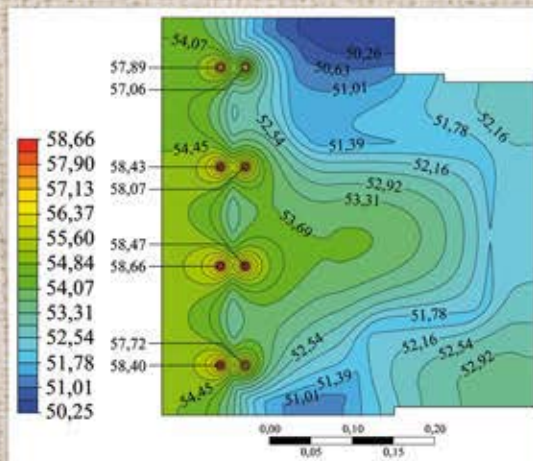
в)



г)



д)



Номер готували
Дніпро, Київ, Одеса, Харків,
Херсон.



Пишіть
Передплачуйте
Читайте