ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ В ЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

До статті «Утворення дефектів на поверхні Si-підкладок в процесі термічного напилення золота»



Зображення порушеної поверхні підкладок після селективного травлення



 $\left(\right)$

АСМ-зображення кремнієвої підкладки з золотом, напиленим

з дроту та з корольків

Кристал ФД з поганою адгезією Аи

Зображення "крапель" Аu та порушення структури кремнію після їх механічного знімання



НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГІЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ В ЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ»

ISSN 2225-5818 (Print)

ISSN 2309-9992 (Online)

Виходить один раз в 3 місяці

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. Беляєв (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)

РЕДАКЦІ́ЙНА КОЛЕГІ́Я

Д. т. н. С. Г. Антощук (м. Одеса, Україна) Д. т. н. А. П. Бондарев (м. Львів, Україна) Prof. I. Vajda (Budapest, Hungary) Prof. D. Vinnikov (Tallinn, Estonia) Prof. I. Galkin (Riga, Latvia) К. т. н. Е. М. Глушеченко (м. Київ, Україна), заст. головного редактора Dr. D. Guilbert (Lorraine, France) Prof. K. Dhoska (Tirana, Albania) Д. ф.-м. н. В. В. Должиков (м. Харків, Україна) Д. т. н. А. О. Дружинін (м. Львів, Україна) Д. т. н. А. А. Єфіменко (м. Одеса, Україна), заст. головного редактора Д. ф.-м. н. Д. В. Корбутяк (м. Київ, Україна) Д. т. н. С. І. Круковський (м. Львів, Україна) Чл.-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. В. С. Лисенко (м. Київ, Україна) Prof. J. Martins (Caparica, Portugal)

D. Eng. D. Morales (Granada, Spain) Д. т. н. І. Ш. Невлюдов (м. Харків, Україна) Dr. Sc. D. Nika (Chisinau, Moldova) Д. т. н. Ю. Є. Ніколаєнко (м. Київ, Україна) Prof. V. Pires (Setúbal, Portugal) Д. ф.-м. н. С. В. Плаксін (м. Дніпро, Україна) К. т. н. В. М. Прокопець (м. Київ, Україна) D. Eng. N. Rodriguez (Granada, Spain) Prof. E. Romero-Cadaval (Badajoz, Spain) К. ф.-м. н. О. В. Рибка (м. Харків, Україна) К. т. н. А. В. Садченко (м. Одеса, Україна) К. т. н. П. С. Сафронов (м. Київ, Україна) Д. т. н. В. С. Ситніков (м. Одеса, Україна) К. т. н. С. А. Степенко (м. Чернігів, Україна) Dr. Sc. Z. Stević (Belgrade, Serbia) Д. х. н. В. М. Томашик (м. Київ, Україна) К. т. н. В. Є. Трофімов (м. Одеса, Україна) К. т. н. О. В. Троянський (м. Одеса, Україна)

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

Контактна інформація

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

Редакція

О. А. Тихонова, А. А. Єфіменко О. О. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова, Є. І. Корецька



Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України у галузях «Технічні науки», «Фізико-математичні науки» (категорія «Б») за спеціальностями 105, 123, 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; реферується в УРЖ «Джерело»

> Номер вийшов за підтримки Національного університету «Одеська політехніка», НВП «Сатурн», НВП «Електрон-Карат»

Схвалено до друку Вченою радою Національного університету «Одеська політехніка» (Протокол № 7 від 19.12 2023 р.) Відп. за випуск: О. А. Тихонова

СПІВЗАСНОВНИКИ

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України; Науково-виробниче підприємство «Сатурн»; Національний університет «Одеська політехніка»; Видавництво «Політехперіодика»

> Свідоцтво про реєстрацію № КВ 25451-15491ПР від 03.02.2023 р.





Рік видання 47-й

3MICT

Технічна політика

Використання часткового зарядно-розрядного циклу акумуляторної батареї для збільшення її ресурсу. *Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф.*...... 9

Сенсоелектроніка

Біомедична електроніка

Технологічні процеси та обладнання

Матеріали електроніки

Вплив вмісту домішок та структурних дефектів на властивості детектора на основі Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V. *Кондрик О. І., Солопіхін Д. О.*..... 52

Забезпечення теплових режимів

Візуалізація процесів пароутворення та теплові характеристики тонкої плоскої гравітаційної теплової труби з різьбовим випарником. *Мельник Р. С., Ліпніцький Л. В., Ніколаєнко Ю. С., Кравець В. Ю.* 65

SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL

Publication year 47th

CONTENTS

Technical policy

Renovation of radio-electronic devices by reengineerin. Lavrych Yu. M., Bystrov M. I., Plaksin S. V., Pogorila L. M., Shkil Yu. V	3
Power electronics	
Using partial charge-discharge cycle of battery to increase its lifespan. <i>Lipko D. O., Bondarenko O. F.</i>	9
Using vanadium dioxide critical thermistors to protect solar cells from overheating. <i>Kolbunov V. R., Tonkoshkur O. S., Mazurik S. V., Lyashkov A. Yu., Nakashydze L. V.</i>	16
Concentrator photovoltaic module based on silicon photoconverters. Chernenko V. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M., Dvernikov B. F., Pekur D. V., Kolomzarov Yu. V., Kornaga V. I., Sorokin V. M	20
Models and algorithms for optimizing the location of solar batteries. <i>Yefimenko A. A., Prisyazhniuk L. I.</i>	24
Sensors	
Increasing the sensitivity and radiation resistance of temperature sen- sor-converters using generators based on unijunction transistors. <i>Vikulin</i> <i>I. M., Vikulina L. F., Markolenko P. Yu., Nazarenko O. A.</i>	35

Biomedical electronics

Designing medical devices for non-invasive diagnostics using microwave radiometry. *Gaevskyi V. S., Glushechenko E. M., Labunskyi V. V., Tuz O. D.* 39

Production technology and equipment

Materials of electronics

Influence of the content of impurities and structural defects on the pro-	
perties of the Cd _{0.9} Mn _{0.1} Te:V-based detector. Kondrik O. I., Solopikhin	
D. A	52

Thermal management

Visualization of vaporization processes and thermal characteristics of	
a thin flat gravity heat pipe with a threaded evaporator. Melnyk R. S.,	
Lipnitskyi l. V., Nikolaenko Yu. E., Kravets V. Yu	65

Reviewers	80
Heat transfer characteristics of miniature heat pipes for cooling systems for electronics. <i>Kravets V. Yu., Khairnasov S. M., Romashchenko M. D., Danilovich A. O.</i>	74

© Technology and	l design in electronic equij	pment, 2023.

TECHNOLOGY AND DESIGN IN ELECTRONIC EQUIPMENT

The journal is included in the category «Б» of the List of scientific specialized publications of Ukraine in the fields of Technical Sciences and Physical and Mathematical Sciences by the following specialties: 105, 123, 132, 141, 151, 152, 163, 171, 172

The journal is referenced in the International reference system «Ulrich's Periodicals Directory» (USA), CrossRef bibliographic references system, DOAJ database, Open Ukrainian Citation Index (OUCI) citation database, Google Scholar.

The issue was released with the support of Odesa Polytechnic National University, SPE «Saturn», SRC «Elektron-Carat» Approved for publication by Odesa Polytechnic National University Academic Council

(Summary Records N 7, 19.12 2023)

Editor in charge of the issue: Olena Tykhonova

FOUNDERS:

V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine (Kyiv); Scientific production enterprise «Saturn» (Kyiv); Odesa Polytechnic National University; Publishing house «Politehperiodika» (Odesa)

> Registration certificate KB 25451-15491IIP of 03.02.2023

УДК 62.112.5+658.5

К. т. н. Ю. М. ЛАВРИЧ, М. І. БИСТРОВ, д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСІН, Л. М. ПОГОРІЛА, Ю. В. ШКІЛЬ

Україна, м. Дніпро, Інститут транспортних систем і технологій НАН України E-mail: jurynlav@gmail.com

ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ШЛЯХОМ РЕІНЖИНІРИНГУ

Проаналізовано проблеми підтримки працездатності експлуатованих зразків радіоелектронної апаратури, які виробили свій технічний ресурс і для яких припинено виготовлення елементної бази. Обґрунтовано підхід до продовження життєвого циклу технічних виробів шляхом відновлення цільових функцій модулів та комірок, використовуючи технології реінжинірингу. Можливості реінжинірингу демонструються на прикладі функціональної системи контролю 4ПК, що входить до складу апаратури РЛС 5Н86 ("Hen House"), яка перебуває в експлуатації з 1975 р.

Ключові слова: реінжиніринг, ресурс, модуль, комірка, елементна база.

Вітчизняна радіоелектронна апаратура (РЕА), яка перебуває в експлуатації з минулого століття, в більшості своїй практично вичерпала встановлений технічний ресурс. В розвинених країнах світу оптимальним вважається співвідношення між новою, сучасною та застарілою апаратурою 25/50/25%, в той час як для України це 0,5/1,5/98% [1]. Але проблема експлуатації багатьох зразків техніки, що містять РЕА з морально застарілою елементною базою, характерна не лише для України, але й для низки провідних країн світу. Чим далі відкладається модернізація та продовжується використання техніки за межами встановленого ресурсу, тим більше втрачається її функціональність і зростають експлуатаційні витрати. Досвід експлуатації РЕА вказує на усталену тенденцію випередження морального старіння використаної елементної бази (ЕБ) відносно морального старіння зразків. На сьогодні для нашої країни ця проблема стоїть вкрай гостро, оскільки жодна сучасна складна система озброєння та військової техніки (ОВТ) не може існувати без електроніки, а життєвий цикл ОВТ є тривалим (30—50 років). За цей час відбувається безнадійне старіння застосованої ЕБ і функціональна деградація електронних систем щодо тих рівнів можливостей, які будуть необхідні через 15-20 років, у разі неспроможності систем еволюціонувати та розвиватися у процесі своєї експлуатації. Життєвий цикл експлуатації багатьох вітчизняних зразків РЕА також значно перевищує період випуску та реалізації ЕБ. Це означає, що апаратура продовжує експлуатуватися, але більша частина її електронних компонентів вже знята з виробництва, їх немає в запасному комплекті елементів та приладдя, і це ставить під сумнів можливість виконання покладених на техніку завдань належним чином.

Одним зі шляхів підтримки технічного стану РЕА є модернізація та ремонт. Проте, ремонт застарілих систем означає збереження застарілого та ненадійного обладнання, він не здатний гарантувати працездатність відремонтованої техніки, оскільки ресурс тих елементів, що не замінюються, давно витрачений. Крім того, у [2] показано, що залишковий ресурс напівпровідникового елемента при введенні його в експлуатацію після зберігання протягом 20 років при плюсовій середньорічній температурі та відсутності електричного навантаження становить близько 80% від початкового середнього напрацювання до відмови, тобто ресурс такого елемента зменшився на 20%. Очевидно, що такого ж порядку зниження ресурсу слід очікувати і від електронного пристрою, побудованого на цих елементах [3].

У зв'язку зі сказаним, очевидно, що для багатьох країн стоїть проблема вибору: модернізувати стару техніку чи замінювати її на нову. З цим зіткнулися такі країни — "донори технологій", як США, Німеччина, Франція, Великобританія, і їхні розробники техніки вже перейшли до стратегії вдосконалення своїх напрацювань, тобто до модернізації старої техніки. В сучасних умовах життєвий цикл техніки починає зростати, і на прикладі ОВТ можна бачити, що майже всі види озброєнь на ринку — це вдосконалені розробки дуже далеких часів. Вічна конструкторська суперечка — хто краще зробить, змістилася у площину — хто краще модернізує. Треба сказати, що цей напрямок приваблює дедалі більшу кількість розробників у багатьох країнах завдяки однозначному отриманню більш високих функціональних характеристик при використанні як нових, так і вже наявних апаратних засобів. Адекватність сучасним вимогам певною мірою може бути досягнута шляхом модернізації, метою якої апріорі ϵ не тільки вдосконалення наявних характеристик, а й створення необхідних нових.

Сучасним завданням відновлення РЕА поряд з відтворенням її функцій на колишньому рівні є створення потенційних можливостей, які не будуть використані одразу після відновлення, але стануть науково-технічним заділом, розрахованим на розвиток. З цієї точки зору актуальним є вивчення наявних технічних рішень з урахуванням їх подальшого використання за допомогою реінжинірингу.

В цій роботі описується приклад використання технології реінжинірингу для продовження життєвого циклу РЕА, що виробила свій технічний ресурс і для якої припинено виготовлення елементної бази. Об'єктом модернізації була функціональна система контролю 4ПК, що входить до складу апаратури РЛС 5H86 ("Hen House"), яка перебуває в експлуатації з 1975 р. Система контролю 4ПК має 4-рівневу конструктивно-ієрархічну схему (шафа, блок, комірка, модуль), перший і другий рівень схеми представлені у вигляді модуля типу 2ТМ і комірки 2ТЯ, які мають властивість конструктивно-схемної функціональної закінченості. У складі РЛС комірка 2ТЯ є основним конструкторським елементом масового застосування (приблизно 80%), тому відповідно до критеріїв вибору саме вона була об'єктом реінжинірингу.

Застосування технології реінжинірингу до РЕА, що виробила свій технічний ресурс

Наразі українські вчені займаються питанням реінжинірингу, але переважна більшість досліджень стосується бізнес-процесів, зрідка зустрічаються роботи в області логістики, програмного забезпечення, електроенергетичних систем, наприклад [4—6], тоді як стосовно РЕА такого роду публікацій практично немає. Тому спочатку зупинимося на деяких аспектах застосування технології реінжинірингу для відновлення РЕА з витраченим технічним ресурсом, що може стати одним з основних механізмів продовження і відновлення працездатності апаратури в існуючих умовах.

Реінжиніринг — це комплекс досліджень, які проводяться з метою отримання всієї необхідної технічної інформації про технічний об'єкт: принципи роботи, конструктивні особливості, взаємозв'язки між конструктивними елементами, способи виробництва і технології, рівень надійності пристроїв в цілому і їхніх складових тощо. Будь-який об'єкт техніки, створений людиною, може бути вивчений іншою людиною щодо розкриття її "секретів". Глибина опрацювання визначається завданнями дослідження, особливостями об'єкта дослідження, а також обмеженнями, пов'язаними з ресурсними можливостями дослідника (фінансовими, методичними, апаратнодослідницькими та ін.). Існує думка, що реінжиніринг використовується виключно для вивчення нових зразків техніки з метою створення її аналогів, тобто, по суті, для копіювання. Але насправді основна мета реінжинірингу — це створення інноваційних технічних рішень з використанням вже отриманих кимось раніше даних для власних науково-дослідних та дослідноконструкторських розробок.

У випадку модернізації РЕА дослідження мають стосуватися цілого спектру технічних питань — при вивченні об'єкта техніки, що належить до електронних пристроїв, досліднику, як мінімум, доведеться виявити всі конструктивні елементи, встановити зв'язок між ними, відновити принципову схему роботи пристрою. Зрозуміло, що в умовах швидкого розвитку нових технологій закласти в нинішні технічні вимоги до систем РЕА показники, які будуть необхідні через двадцять років, навряд чи можливо. Перед тим як зробити остаточний вибір як самого об'єкта модифікації, так і його майбутнього номенклатурного, функціонального, кількісного та якісного складу, необхідно виконати техніко-економічний та технологічний аудит потенційного об'єкта реінжинірингу, запланованого лля перевелення на нову елементну базу. та стану мікроелектронної галузі країни, що дозволить сформулювати проблеми та завдання і намітити концепцію досягнення поставленої мети. Таким чином, застосування реінжинірингу потребує фундаментального переосмислення та перепроєктування існуючих конструктивно-схемних основ побудови об'єкта реінжинірингу для забезпечення його відновлення та поліпшення. Це необхідний та обов'язковий етап створення інструменту для забезпечення перерахованих умов реінжинірингу. Виконання його вимагає насамперед написання декларації намірів зміни, при цьому діапазон зміни, який визначають спільно розробник та замовник, може охоплювати або об'єкт реінжинірингу повністю, або окремі рівні його конструктивно-ієрархічної побудови аж до окремого зразка на певному рівні. Підсумком спільної роботи має стати розробка технічного завлання (ТЗ) на обраний об'єкт реінжинірингу. Стосовно існуючої РЕА доцільно визначити номенклатуру початкових і полальших робіт з модернізації РЕА в цілому з урахуванням матеріальних можливостей сучасного періоду, а також терміни кожного етапу реінжинірингу.

Конструктивно-ієрархічна схема більшості РЕА є багаторівневою. Але при цьому в більшості РЕА використовується принцип модульності як сукупності принципів проєктування та конструювання, для якого характерна одна загальна вимога — електричні схеми та конструкції (модуль, комірка, блок тощо) апаратури мають бути функціонально закінченими на відповідних рівнях. Вибір конструктивного рівня існуючої РЕА як об'єкта реінжинірингу здійснюють виходячи з того, наскільки затребуваним є цей рівень, наскільки витрачений його ресурс, якими є обсяги формування цільових функцій, наскільки цей рівень є ремонтопридатним.

Проведений аудит конструктивного виконання РЕА показав, що в умовах обмежених матеріальних можливостей доцільно зберегти базові несучі конструкції (БНК) обраних рівнів, попри те, що сучасна елементна база має значно менші конструктивні розміри. Використання наявної БНК дозволяє зменшити собівартість переведення комірки на нову елементну базу приблизно на 30%, оскільки частка БНК в оптовій ціні становить близько 40%. Збереження БНК усіх рівнів, зокрема модуля та комірки, дозволить не тільки знизити матеріальні витрати, але й зменшити час переведення на нову елементну базу, забезпечити повну конструктивну ідентичність та взаємозамінність всіх рівнів РЕА. Основними елементами БНК комірки 2ТЯ є друкована плата, на якій розміщуються модулі типу 2ТМ та з'єднувач типу РП14-30. З'єднувач є частиною друкованої плати комірки, і його збереження забезпечує швидку заміну комірки у складі блока. Проведений реінжиніринг показав, що з урахуванням вартісного фактора доцільно зберегти лицьову панель та з'єднувач комірки при переведенні комірки на нову елементну базу.

Нова схемотехнічна побудова обраних об'єктів реінжинірингу може бути забезпечена лише переходом на сучасну елементну базу. Для цього потрібен не тільки вибір електронних компонентів, а й дослідження схемотехнічних рішень функціональних вузлів на логічному та електричному рівнях, їх моделювання та подальше перепроєктування модулів і комірок як елементів першого та другого конструктивного рівня РЛС. Тут слід зауважити, що у перших поколіннях вітчизняної РЕА дозволялося застосування лише власної елементної бази, і це вносить свої складності.

Однією з перспективних технологій виготовлення елементної бази є системи на кристалах (Systemon-a-Chip, SoC). Безумовно, сучасний рівень напівпровідникової технології дозволяє створювати якісно нову елементну базу, зокрема п'ятого покоління, що передбачає інтеграцію великої кількості мікросхем і дискретних елементів в один кристал. Але, на жаль, попри всю перспективність технології SoC, в Україні вони не освоєні. З огляду на наявний технологічний уклад економіки країни, застосування технології SoC є доцільним лише в умовах повноцінного проєктування нового покоління перспективної PEA і не може бути застосовано при відновленні працездатності існуючих зразків.

Важливим критерієм вибору ЕБ є тривалість життєвого циклу компонентів та їхня здатність до еволюціонування та функціонування протягом всього життєвого циклу РЕА. Вибір елементної бази є актуальним завданням та предметом наукових досліджень, під час яких мають бути розроблені концептуальні основи.

Результати реінжинірингу

Секретом досягнення успіху у технології реінжинірингу є спосіб організації процесів з використанням власного науково-технічного заділу за умови дотримання принципів, закладених ідеологами реінжинірингу — швидше, краще та дешевше [7].

В нашому випадку реінжиніринг необхідний як при виборі елементної бази, так і при пошуку схемотехнічних рішень функціональних вузлів на логічному та електричному рівнях, їх моделюванні та подальшому перепроєктуванні апаратури на рівні модулів як елементів першого конструктивного рівня та комірок як елементів другого конструктивного рівня. При аналізі електричних схем обраної номенклатури реінжинірингу комірок 2ТЯ блоку 4ПК-14 (що містять 8—12 різних модулів типу 2TM) встановлено, що основними функціональними вузлами є схеми збігу, перетворювачі рівнів, тригери, лічильники, регістри, суматори, повторювачі, інвертори тощо. Для встановлення принципів роботи наявних комірок та модулів проведено їх моделювання з використанням програмних інструментів на базі програмних засобів MATLAB Simulink версія R2020A, Tina-Ti (Texas Instruments), Electronics Workbench, Micro Сар. Вхідними даними для моделювання є вхідні та вихідні сигнали наявних модулів згідно з електричною принциповою схемою.

Проведений реінжиніринг наявних комірок та модулів показав, що реалізація функцій забезпечується напівпровідниковою ЕБ на основі германієвої технології. Схемотехнічні рішення функціональних вузлів на логічних рівнях ґрунтуються на використанні негативної діодно-транзисторної логіки. Схемотехнічні рішення цифрових функціональних вузлів представлені дискретними елементами. В основу покладено негативну логіку при від'ємній напрузі живлення.

Проведене моделювання всіх типів модулів дозволило отримати дані для їх перепроєктування на новій елементній базі. Вихідним продуктом реінжинірингу стає модель (**рис. 1**), яка дозволяє провести дослідження модулів комірки, принципів роботи, ступеня відповідності закладеним функціям і способів реалізації. Кожна отримана модель модуля перевіряється на правильність функціонування на наявній ЕБ з використанням таблиць істинності в логічних рівнях, рівнях напруги та часових діаграмах, отриманих в ході моделювання.

Для перевірки можливості збереження принципів роботи комірок та модулів на новій ЕБ також проведено їх моделювання з використанням інструментів симуляції програмних засобів Tina-Ti (Texas Instruments), Electronics Workbench, MicroCap та результатів моделювання наявних модулів. Проведений реінжиніринг модулів 2TM дозволив визначити проблему, пов'язану з вибором нової ЕБ — необхідність пошуку способу узгодження різних рівнів при перехо-

ТЕХНІЧНА ПОЛІТИКА



Рис. 1. Модель схеми одного каналу двоканальної схеми збігу модуля 2TM-50

ді на нову ЕБ. Цей момент є дуже важливим, оскільки решта частина РЛС залишається лише з негативною логікою, а переважна більшість елементів сучасної ЕБ спроєктована на позитивній логіці та додатній напрузі живлення. У модулях і комірках, що підлягають переведенню на нову ЕБ, допускається використання лише від'ємної напруги, щоб не порушати архітектуру енергоживлення діючої РЛС. В апаратурі, що підлягає відновленню, для логічного рівня нуля прийнято напругу 0 В, а для логічної одиниці — мінус 7,2 В. Сучасні серії інтегральних мікросхем у переважній більшості спроєктовані та працюють у логічному узгодженні позитивної логіки та додатної напруги живлення.

При переході до інверсного живлення мікросхем, що виконують операцію 2АБО в позитивній логіці при додатному живленні, одержуємо операцію 2І в негативній логіці при від'ємному живленні (базові елементи 2АБО-НІ та 2І-НІ). Це забезпечує адекватний перехід за функціональним призначенням від дискретної схемотехніки до схемотехніки на інтегральних мікросхемах з усіма позитивними наслідками (підвищення надійності, збільшення запасу по швидкодії, узгодження за рівнями сигналів, споживаної потужності, масогабаритних показників тощо). Тому для РЛС забезпечення узгодження обраних об'єктів реінжинірингу (2ТЯ, 2ТМ), переведених на нову ЕБ, з немодернізованими об'єктами однозначно характеризує саму можливість розробки нового конструктивно-схемного аналога для заміни існуючого. Нова ЕБ обиралася з урахуванням наявних власних технологій виготовлення, а з доступної сьогодні номенклатури закордонних аналогів серій мікросхем, із врахуванням стану РЛС та фінансових можливостей, були застосовані серії 4000 і 7400. Ця елементна база дозволила провести моделювання модулів комірки. Так, наприклад, модуль 2ТМ-50 на новій ЕБ складається з чотирьох ідентичних схем в ін-



Рис. 2. Модель каналу схеми збігу модуля 2ТМ-50

тегральному виконанні, розміщених в одному корпусі DIP14, що виконують операцію 2АБО-НІ в негативній логіці та при інверсній напрузі живлення (мікросхема серії SN74HC02, виробник Texas Instruments).

Моделювання здійснено у системі ТІNA. Для побудови комірок та модулів використано комерційний варіант елемента: температурний діапазон роботи від 0 до $+70^{\circ}$ С; вага 0,25 г; напруга живлення 5 В, максимальний вихідний струм 5 мА, логічний рівень нуля 0—0,4 В, логічний рівень одиниці 2,4—5,0 В. Одна мікросхема функціонально замінює два модулі. Енергоспоживання нового модуля значно менше ніж існуючого, що суттєво позначиться на надійності модуля. Результати моделювання одного із чотирьох каналів схеми збігу, що формуються застосованою новою ЕБ, його вхідні (VG1 та VG2) та вихідні (VF1) сигнали наведено на **рис. 2**.

Отримані за результатами моделювання таблиці істинності в логічних рівнях, в рівнях напруги та часові діаграми в обох випадках порівнюються для оцінки відповідності розроблених моделей. Схемотехнічна побудова нового модуля радикально відрізняється від старої — новий модуль можна виконати набагато простіше, при цьому його габаритні розміри будуть суттєво меншими, тому розміщення нового модуля у збереженій БНК комірки спрощує забезпечення тепловідводу і не потребує зміни характеристик систем забезпечення температурного режиму.

У ході реінжинірингу, керуючись вимогою повної замінюваності комірки та модуля, крім відтворення закладених функцій необхідно розв'язати питання конструктивної ідентичності друкованих плат як несучих конструкцій для модулів та комі-

ТЕХНІЧНА ПОЛІТИКА



 y1
 y5
 y8

 y2
 y3
 y4
 y6



Рис. 3. Схема розташування пристроїв на старій та на новій ЕБ на друкованих платах (*a*) та їх загальний вигляд (*б*):

У1 — канал схеми збігу модуля 2ТМ-50 на старій ЕБ; У2, У3 — канали схеми збігу модуля 2ТМ-50 на новій ЕБ; У4, У5 — стенд перевірки модуля та комірки; У6 — кварцовий генератор (1000 кГц); У7, У8 — тумблери перемикання видів логік

рок. Особливістю обох видів плат усієї номенклатури комірок 2ТЯ та модулів 2ТМ є одностороннє виконання. Але для монтажу нової ЕБ друкована плата модуля 2TM не може бути збережена в наявному вигляді, і потрібна розробка нової плати з обов'язковим збереженням існуючих розмірів (108×50 мм). Для комірки 2ТЯ плату можна залишити в старому вигляді, оскільки на ній встановлюються тільки модулі 2ТМ, інших елементів немає. При цьому з огляду на перспективи використання отриманих результатів реінжинірингу доцільно розробити нову об'єднувальну плату комірки 2ТЯ за умови збереження існуючих типорозмірів (285×128×61 мм). Крім того, у процесі моделювання комірок на новій елементній базі розробляється повний комплект конструкторської документації, що дозволяє виготовляти нові вироби на новій ЕБ.

Порівняльні випробування результатів моделювання проводилися на розроблених макетних зразках модуля збігу на новій ЕБ і модуля з аналогічними функціями, що існує на об'єкті експлуатації (**рис. 3**). Проведені випробування підтвердили правильність вибору способу переходу логік і можливість його застосування для переведення інших систем РЛС на нову ЕБ.

На рис. 3, *а* наведено структурну схему взаємного розташування пристроїв на друкованій платі. Як видно, крім одного каналу схеми збігу модуля 2TM-50 (У1) на старій ЕБ, тут розміщено вісім каналів схеми збігу модуля 2TM-50 (У2, У3) на новій ЕБ (по 4 канали на мікросхемах SN 7400 та CD 4000). На цій же платі встановлено стенд перевірки модуля та комірки (У4, У5), елементами якого є також кварцовий генератор (У6), тумблери перемикання видів логік (У7, У8), індикатори функціонування. Результати випробувань схем зі спільним використанням двох типів мікросхем підтвердили повну відповідність технічному завденню.

Комірка 2ТЯ-81 складається з п'яти модулів 2TМ-50, кожен з яких містить дві схеми збігу. Повний набір функцій комірки забезпечується десятьма схемами збігу і може бути реалізований на трьох мікросхемах типу SN7400, CD4000, при цьому збережені конструктивні розміри плати дозволяють встановити потрібне число мікросхем для реалізації повного набору функцій всією коміркою. Для реалізації функцій комірки 2ТЯ-510 використовується вісім модулів 2ТМ-50, що містять по дві схеми збігу 2І-НІ в негативній логіці при від'ємному живленні, тобто 16 схем збігу. В комірці 2ТЯ-510, переведеній на нову ЕБ, на тій же платі встановлюється всього один модуль з чотирма мікросхемами типу CD4000, SN7400, при тому що число схем збігу у новій комірці теж дорівнює шістнадцяти.

Функції комірок забезпечуються тепер меншою кількістю елементів. Так, в старому варіанті комірки 2ТЯ-81 використовувалося 10 транзисторів, 30 діодів, 50 резисторів і 10 конденсаторів, тоді як на новій ЕБ — всього 3 мікросхеми. Аналогічно, для реалізації функцій комірки 2ТЯ-510 раніше було задіяно 16 транзисторів, 48 діодів, 96 резисторів і 16 конденсаторів, тепер — 4 мікросхеми. Для реалізації функцій цих двох комірок використовувалося 26 схем збігу, а на новій ЕБ забезпечується 7 мікросхемами.

Висновки

Таким чином, в результаті проведених досліджень доведено, що реінжиніринг РЕА з витраченим технічним ресурсом є ефективним механізмом відновлення її працездатності та продовження життєвого циклу.

Розроблена в ході реінжинірингу технологія відновлення працездатності РЕА шляхом переведення на нову елементну базу має великий потенціал подальшої модернізації й більш високих конструктивноієрархічних рівнів функціонально закінченої апаратури. При цьому при переведенні на нову елементну базу можна забезпечити цільові функції високих конструктивних рівнів побудови більш низькими (принаймні на один рівень). Так, відносно проаналізованих комірок попередньо встановлена можливість реалізації функцій блоку коміркою, а комірки — модулем.

Результати моделювання низки комірок 2ТЯ показали можливість побудови універсальної комірки з використанням у її складі нової елементної бази замість великої номенклатури компонентів попереднього виконання. Використання такого підходу при проєктуванні нових комірок дозволяє створити універсальну типову комірку заміни. Надлишкові апаратні та програмні ресурси реконфігурації в кожній конкретній реалізації можуть бути використані як для реалізації необхідних функцій комірки, так і для самодіагностики.

ТЕХНІЧНА ПОЛІТИКА

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Климченко В. Й., Бєлавін О. В. Обгрунтування раціонального співвідношення обсягів капітального ремонту, модернізації і закупівлі та розробок ОВТ РТВ на середньострокову та довгострокову перспективи. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, 2013, вип. 3(36), с. 35–41.

2. Федухин А. В. Прогнозирование надежности электронных устройств после длительного хранения. *Математичні машини і системи*, 2004, № 4. с. 164–170.

3. Лаврич Ю. Н. Исследование влияния длительного хранения на характеристики солнечных батарей. Труды II МНПК "Полупроводниковые материалы, информационные технологии и фотовольтаика", Кременчук, Україна, 2013, с. 79–80.

4. Безкоровайний В. В., Судік А. О. Оптимізація топологічних структур централізованих логістичних мереж у процесі реінжинірингу. Сучасний стан наукових досліджень та технологій

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.03 UDC 62.112.5 *в промисловості*, 2121, № 1(15), с. 23–31. https://doi.org/10.30837/ ITSSI.2021.15.023 (Eng)

5. Великодний С.С., Зайцева-Великодна С.С., Бурлаченко Ж.В. Програмне забезпечення для автоматизованого проектування мережевої графіки програмного забезпечення систем реінжинірингу. Вісник передових інформаційних технологій, 2019, т. 2, № 2, с. 95–107. https://doi.org/10.15276/hait.02.2019.2 (Eng)

6. Нечипоренко А. С., Губаренко Є. В., Губаренко М. С. Реінжиніринг топологічної структури регіональних електроенергетичних систем. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 2022, № 2(102), с. 49–62. https://doi.org/10.32620/reks.2022.2.04 (Eng)

7. Хаммер М., Хершман Л. Быстрее, лучше, дешевле: 9. методов реинжиниринга бизнес-процессов. Альпина Паблишер, 2017, 360 с.

Дата надходження рукопису до редакції 09.05 2023 р.

Yu. M. LAVRYCH, M. I. BYSTROV, S. V. PLAKSIN, L. M. POGORILA, Yu. V. SHKIL

Ukraine, Dnipro, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine E-mail: jurynlav@gmail.com

RENOVATION OF RADIO-ELECTRONIC DEVICES BY REENGINEERING

Domestic radio-electronics, which is still incorporated in many electronic devices, has practically exhausted its technical resource. The longer modernization is postponed and the radio-electronic equipment based on outdated elements remains in use, the more its efficiency declines and operating costs increase. This paper analyzes the problems of maintaining the operational efficiency of radio-electronics that has exhausted its technical resource and the production of its elemental base has been discontinued. The authors substantiate the approach to extending the life cycle of technical products by updating the target functions of modules and cells through reengineering. The reengineering was performed for the functional control system 4PK, which is part of the radar 5N86 ("Hen House"), which has been in operation since 1975. To check the possibility of preserving the existing operating principles, simulations of cells and modules on the new elemental base and existing modules were carried out using Tina-Ti software simulation tools (Texas Instruments), Electronics Workbench, Micro Cap. The results of the reengineering of the 2TM modules indicated the problem of choosing a new element base — they use negative logic, which complicates the using a series of modern elemental base, the vast majority of elements of which are designed on positive logic and positive supply voltage. In order not to disturb the power supply architecture of the active radar, a way was found to coordinate different levels. Testing the model showed a positive result, and a number of cells showed the possibility to build a universal cell using reconfigurable electronic microcircuits in its composition.

Keywords: reengineering, resource, module, cell, element base.

REFERENCES

1. Klimchenko V.I., Belavin A.V. Ground of rational correlation of volumes of major repairs, modernization and purchase and developments of OVT RTV on medium-term and long-term prospects. *Scientific works of Kharkiv national air force university*, 2013, vol. 3(36), pp. 35–41. (Ukr)

2. Fedukhin O.V. Forecasting of electronic devices reliability after long storage. *Mathematical Machines and Systems*, 2004, no. 4, pp. 164–170. (Rus)

3. Lavrych Yu. M. The research of the influence of long-term storage on the characteristics of solar batteries. *Proceedings of the II MNPC "Semiconductor materials, information technologies and photovoltaics"*, Kremenchuk, Ukraine, 2013, pp. 79–80. (Rus)

4. Beskorovainyi, V., Sudik, A. Optimization of topological structures of centralized logistics networks in the process of reengineering. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2021, no. 1 (15), pp. 23–31. https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.023

5. Velykodniy S.S., Zaitseva-Velykodna S.S., Burlachenko Zh.V. Software for automated design of network graphics of software systems reengineering. *Herald of Advanced Information Technology*, 2019, vol. 2, № 2, pp. 95–107. https://doi.org/10.15276/hait.02.2019.2

6. Nechiporenko A., Hubarenko Ye., Hubarenko M. Topological structure reengineering regional electric power systems *Radioelectronic and Computer Systems*, 2022, no. 2(102), pp. 49–62. https://doi.org/10.32620/reks.2022.2.04

7. Hammer M., Hershman L. Faster Cheaper Better: The 9 Levers for Transforming How Work Gets Done. Crown Business, 2010, 302 p.

Опис статті для цитування:

Лаврич Ю. М., Бистров М. І., Плаксін С. В., Погоріла Л. М., Шкіль Ю. В. Відновлення працездатності радіоелектронних пристроїв шляхом реінжинірингу. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4, с. 3–8. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2023.3-4.03

Cite the article as:

Lavrych Yu. M., Bystrov M. I., Plaksin S. V., Pogorila L. M., Shkil Yu. V. Renovation of radio-electronic devices by reengineerin. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 3–8. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.03

УДК 621.355:621.311.61

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.09

Д. О. ЛІПКО, к. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТКОВОГО ЗАРЯДНО-РОЗРЯДНОГО ЦИКЛУ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЇЇ РЕСУРСУ

Проаналізовано середньостатистичний денний пробіг автомобіля в Україні та інших країнах і встановлено, що він значно менший запасу ходу будь-якого серійного електромобіля. Було досліджено, як впливає обмеження глибини розряду акумуляторної батареї на її ресурс в таких умовах. Отримані результати показали, що при використанні циклу з обмеженням глибини розряду до 50% ресурс батареї можна збільшити на 20% і більше. Розглянуто шляхи модернізації електромобіля для збільшення ресурсу акумуляторної батареї без обмежень для користувача.

Ключові слова: електромобіль, акумуляторна батарея, рівень заряду, частковий цикл, ресурс акумуляторної батареї.

Кількість електротранспорту у світі лише за 2021 рік збільшилася в два рази [1], а в багатьох країнах почали приймати закони про відмову від авто з двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ) у наступні роки [2]. Електромобілі мають багато переваг перед авто з ДВЗ, найважливіша — це відсутність шкідливих викидів [3], що не тільки позитивно впливає на екологію, але також є порятунком для міст з великим скупченням людей [4]. Крім того, електромобілі якоюсь мірою допомагають збалансувати електромережу, оскільки більшість авто заряджаються вночі, коли споживання електроенергії низьке, а електростанції мають надлишкову потужність. Тут також слід згадати технологію Vehicle-to-Grid (V2G), з розвитком якої електромобілі зможуть не тільки заряджатись від мережі, а й віддавати електроенергію назад під час пікового навантаження [5]. Плюсом електромобіля для користувача є те, що вони працюють досить плавно і тихо та є дешевшими в експлуатації — вартість 1 км шляху електромобіля в декілька разів нижча, а регламентного технічного обслуговування вони потребують набагато менше, ніж авто з ДВЗ. Електромотор має досить високий ККД — близько 95%, тоді як дизельний мотор — 30%, а бензиновий — 20% [6]. Можливість рекупераційного гальмування ще більше підвищує ККД електромобіля і може знизити споживання електроенергії на рельєфній місцевості на 20%.

Проте електромобілі мають і недоліки. Головною незручністю для власника є тривале заряджання акумуляторної батареї, яке не можна порівняти з часом заправки авто з ДВЗ. Швидкі зарядні станції, що стали з'являтися на ринку, значно прискорюють цей процес, але навіть 30 хв для заряджання батареї від 10 до 80% рівня заряду (*state of charge*, **SoC**) це набагато довше, ніж заправка паливом на АЗС. До того ж акумуляторна батарея має обмежений ресурс і з часом починає втрачати свою ємність. Деградація акумулятора відбувається й з плином часу (календарна) [8], а також залежить від кількості циклів розряду/заряду [9].

Великою проблемою останніми роками стає утилізація літієвих акумуляторів, до складу яких входять токсичні для довкілля матеріали — кобальт, нікель, літій. Масштабне виробництво електромобілів почалося у 2012 році (це були Nissan Leaf та Tesla Model S), і до сьогоднішнього дня ресурс їхніх батарей вичерпався. При цьому підприємств для вторинного перероблення літієвих акумуляторів у світі дуже мало, хоча деякі виробники електромобілів (Nissan, Renault, Volkswagen) нещодавно почали запускати такі пілотні проєкти для акумуляторів своїх електромобілів. Оскільки без спеціальної утилізації літієві батареї є потенційною загрозою навколишньому середовищу [10], багато хто з фахівців ставлять під сумнів екологічність електромобіля.

Продовження строку експлуатації вже існуючих акумуляторів стає досить актуальним, оскільки відкладає на пізніше проблему перероблення та утилізації старих акумуляторів та дає більше часу на пошук нових технологій виробництва та утилізації батарей. З огляду на важливість проблематики, метою цієї роботи був пошук шляхів продовження ресурсу акумуляторної батареї електромобіля.

Огляд статистичних даних

Електромобіль Nissan Leaf першого покоління у 2011 році мав запас ходу 150 км та ємність акумулятора 24 кВт·год, у 2016-му виробник почав встановлювати акумулятор ємністю 30 кВт·год з запасом ходу 200 км. У 2018 році змінився не тільки зовнішній вигляд електромобіля, а й акумулятор — 40 кВт·год, 280 км, у 2019-му — 62 кВт·год, 385 км. За всі роки



Рис 1. Статистика пробігу автомобілів в Україні залежно від віку [11]

виробництва Nissan Leaf кузов та корпус батареї не зазнавали змін, ємність батареї збільшувалася завдяки використанню акумуляторів з більшою питомою щільністю та технології лазерного зварювання комірок, при цьому загальна вага електромобіля майже не змінювалась.

Автори [11] проаналізували статистику пробігу автомобілів залежно від віку, використовуючи дані інтернет-ресурсу з продажу автомобілів в Україні, оскільки офіційні статистичні дані відсутні. З наведених на рис. 1 видно, що автомобілі віком 2 роки мають середній показник загального пробігу 30 тис. км, віком 20 років — 300 тис. км, з чого можна зробити висновок, що в Україні середньодобовий пробіг слабо залежить від віку автомобіля й становить орієнтовно 41 км.

Статистика інших країн підтверджує той факт, що і там середньодобовий пробіг автомобіля теж не перевищує 50 км, наприклад у Великобританії він складає 25 миль, тобто 40 км [12]. Отже, бачимо, що запас ходу будь-якого серійного електромобіля більший за середньодобовий пробіг середньостатистичного автомобіля.

Ресурс акумулятора на основі літію характеризується кількістю циклів розряд-заряд [13], яка може бути отримана за умови дотримання умов експлуатації електромобіля, визначених виробником. Для сучасних акумуляторів кількість гарантованих циклів розряд-заряд становить мінімум 2000 при втраті до 30% ємності від номінальної. Але на деградацію впливають також інші фактори, такі як температура акумулятора, струм та напруга його заряду та розряду. Чим менше навантаження на акумулятор, тим повільніше відбувається деградація.

В сучасних електромобілях застосовуються літієві акумулятори з різними типами хімічного складу і кожен з них має свої переваги та недоліки (рис. 2), тому виробники електромобілів обирають акумулятори з огляду на умови їх використання [15]. Наприклад, літій-іонні акумулятори LCO, катод яких виготовлений на основі оксиду літій-кобальту (LiCoO₂), анод — з графіту, мають відносно невеликий термін експлуатації, проте вони мають високу питому ємність (240 Вт. год/кг). Недоліком літій-іонних акумуляторів LMO з катодом на основі оксиду літій-марганцю (LiMn₂O₄) є низька питома ємність (150 Вт год/кг), однак їхня термічна стійкість вища порівняно з LCO. Літій-іонні батареї LFP з катодом на



основі оксиду літій-залізо-фосфату (LiFePO₄) мають великий ресурс, високу питому потужність та рівень безпеки водночас з доступною ціною, до того ж такі акумулятори здатні працювати за низьких температур [15]. Літій-іонні батареї NMC з катодом на основі оксиду літій-нікель-кобальт-марганцю (LiNiMnCoO₂) досить широко застосовуються в електромобілях через доступність та збалансовані характеристики. Літій-іонні акумулятори NCA з катодом на основі оксиду літій-нікель-кобальт-алюмінію (LiNiCoAlO₂) мають досить високу питому щільність (280 Вт год/ кг) [17], найбільше вони використовуються у випадках, коли потрібна велика ємність акумулятора, наприклад в електромобілях Tesla. Але ці акумулятори вибагливі до температурного режиму, тому їх не можна використовувати без системи терморегулювання. Літій-іонні акумулятори LTO з катодом на основі оксиду літій-титанату (Li₄Ti₄O₁₂) сьогодні майже не використовуються в електромобілях через високу ціну і низьку питому ємність, але є досить перспективними в майбутньому.

Частковий зарядно-розрядний цикл

Тягова акумуляторна батарея більшості електромобілів складається з 96 послідовно підключених комірок, має загальну напругу 410 В в зарядженому стані, а також містить систему BMS (battery management system), що вимірює напругу окремо на кожній комірці, загальний струм, температуру батареї, на основі чого вираховує поточний рівень SoC батареї, а також прогнозує запас ходу електромобіля. Крім цього, BMS управляє струмом заряду та розряду акумулятора шляхом обміну інформацією з іншими модулями електромобіля через комунікаційну шину CAN-BUS, саме вона зупиняє процес зарядки та розрядки акумулятора. Окрім основних функцій, BMS також здійснює балансування рівня заряду кожної комірки відносно інших — необхідно, щоб всі комірки батареї мали однаковий рівень заряду, адже тільки за такої умови можливе використання повної ємності акумуляторної батареї (рис. 3).

Загальну ємність батареї можна поділити на чотири зони (рис. 4):

А — резерв ємності батареї, заблокований для користувача;



Рис. 4. Зони розподілу ємності акумуляторної батареї

В — ємність, яку користувач може використовувати для дальніх поїздок;

С — доступна користувачеві "повсякденна" ємність;

D — нижній резерв ємності, недоступний користувачеві.

Таким чином, на панелі приладів користувача відображається рівень заряду USoC (*usable state of charge*), що знаходиться в межах зон В та C, а дійсний рівень заряду акумулятора RSoC (*real state of charge*) може знаходитись в діапазоні зон від A до D, але не відображатися для користувача [18].

Рівень деградації (*state of health*, **SoH**) акумуляторної батареї, розраховується як відношення її наявної ємності до номінальної:

$$SoH = C_{real} / C_{nom}.$$
 (1)

Ресурс акумуляторів — це кількість циклів зарядурозряду акумулятора до втрати певної ємності, що може сильно коливатися в більшу або меншу сторону залежно від умов експлуатації. Виробником акумуляторів гарантується певна кількість повних циклів заряду-розряду, тобто ресурс при DoD=100%, за якої SoH не впаде нижче встановленого значення за умови використання акумулятора в заданих виробником режимах роботи, що надаються в технічній документації до кожної моделі. Виробник вказує максимальну напругу заряду та розряду акумулятора, і при функціонуванні акумулятора в цьому діапазоні напруги буде використана його повна ємність,





Рис. 5. Залежність SoH акумуляторної батареї від кількості циклів заряд-розряд при DoD 100% (1) та 50% (2) [14]

а значить глибину розряду (depth of discharge, **DoD**) слід вважати 100%. Загальний ресурс акумуляторної батареї можна вимірювати кількістю повних циклів заряду-розряду, тобто при глибині розряду 100%. Якщо DoD < 100%, то кількість часткових циклів перераховується по відношенню до повних.

Дослідження показали, що SoH літієвого акумулятора залежить від кількості циклів заряду та розряду акумулятора та DoD. З **рис. 5** видно, що за однакового рівня SoH при меншому рівні DoD кількість циклів заряд-розряд акумулятора є більшою. При функціонуванні з DoD = 50% доступна ємність акумуляторної батареї, як і запас ходу, удвічі менша порівняно з експлуатацією при DoD=100%, але за таких умов у понад два рази збільшується кількість циклів заряд-розряд, а отже ресурс батареї також збільшується.

Як можна побачити на рис. 5, після 1500 повних циклів заряду-розряду втрата ємності складає 18% від номінальної (SoH=82%). При частковому циклі заряд-розряд з DoD=50%, тобто при використанні половини ємності акумулятора, втрата 18% ємності настає після 3750 таких циклів. Оскільки за кількістю енергії повний цикл дорівнює двом неповним з DoD=50%, то наявний приріст у 750 таких неповних циклів, або ж 375 повних. Приріст ресурсу акумуляторної батареї при такому частковому циклі складає 20%.





Результати дослідження [19] показали, що кількість повних циклів заряд-розряд акумулятора до втрати певної ємності становить 2600 (**рис. 6**). За таких самих умов експлуатації акумулятора, але при DoD=60% кількість циклів до втрати такої самої ємності дорівнює 6011, тобто при обмеженні робочої ємності величиною 40% від повної ємності приріст складає 3411 циклів. Максимально ефективною є експлуатація при DoD=40%, коли досягається найбільша кількість циклів заряд-розряд, що відповідає максимальному ресурсу батареї.

На основі попереднього аналізу можна зробити висновок, що збільшити ресурс акумуляторної батареї електромобіля можна шляхом обмеження рівня заряду-розряду. В електромобілі, запас ходу якого в декілька разів більший за необхідний денний запас, можна обмежувати рівень заряду шляхом недозаряджання батареї і таким чином регулювати доступну користувачеві ємність залежно від його потреб.

Визначення меж часткового зарядно-розрядного циклу

Виробники електромобілів з великим запасом ходу з самого початку обмежують програмно ємність батареї, створюючи зони А та D (див. рис. 4) для того, аби з часом, коли батарея починає деградувати, використовувати цей резерв для компенсації втраченої ємності. Але, як показало дослідження [19], зниження доступної для використання ємності на 20% (DoD=80%) не призводить до збільшення ресурсу акумулятора. Найефективнішим виявилося використання акумуляторної батареї в межах 40-80% від повної ємності. Отже, якщо у користувача немає потреби у використанні всієї доступної ємності, можна обмежувати рівень заряду батареї верхнім рівнем зони С або навіть нижче. Таке обмеження, скоріш за все, не завдаватиме проблем переважній більшості користувачів.

Також слід враховувати, що для кожного типу акумулятора є рекомендована виробником напруга зберігання, за якої акумулятор найменше деградуватиме у часі. Календарну деградацію необхідно брати до уваги при виборі діапазону доступної користувачеві ємності, оптимізувавши її так, щоб під час простою електромобіля рівень заряду максимально довго знаходився на рівні напруги зберігання, яка зазвичай близька до половини рівня заряду. Таке рішення створює передумови для збільшення терміну експлуатації батареї на десятки років незалежно від кількості циклів заряд-розряд.

Вікно RSoC охоплює діапазон рівня заряду SoC від 0 до 100%. Розмір вікна USoC, яке лежить в межах вікна RSoC, накладає деяке обмеження на доступну для користування ємність. Цей розмір залежить від базових налаштувань BMS, встановлених виробни-





ком електромобіля. В подальшому він може змінюватися системою BMS з огляду на такі фактори, як температура та SoH батареї. В межах вікна USoC знаходиться діапазон DoD, який залежить від того, як саме користувач електромобіля заряджає та розряджає батарею. Зі зменшенням діапазона DoD збільшується кількість можливих варіантів його розміщення відносно SoC (див. рис. 4). Як показує дослідження [19], на кількість циклів окрім DoD впливає також діапазон SoC, в якому використовується акумулятор. На рис. 7 наведено графіки залежності рівня втрат ємності акумулятора від кількості циклів заряду-розряду при використанні акумулятора в певних межах рівня заряду за однакової температури. З цих залежностей видно, що в умовах однакового рівня деградації батареї кількість циклів заряду-розряду залежить від діапазону рівня заряду, причому різниця може бути суттєвою.

Оскільки один повний цикл розряду-заряду акумулятора відповідає певному пройденому шляху електромобіля, кількість таких циклів акумулятора відбиває загальну величину пройденого шляху електромобіля в кілометрах. З рис. 7 було взято інформацію про кількість циклів акумулятора до настання рівня SoH = 90% при використанні у різних діапазонах рівня заряду. Як можна побачити з наведених у **таблиці** результатів, за однакової глибини розряду акумулятора у різних діапазонах рівня заряду кількість циклів заряд-розряд буде різною. Так, при DoD=60% кількість циклів заряд-розряд у діапазоні 100–40%, а при DoD=50% вона буде більшою у діапазоні 75–25%, ніж у діапазоні 100–50%. Тобто можна зробити висновок, що недозаряджання акумулятора позитивно впливає на його ресурс.

Висновки

Отже, обмеження діапазону рівня заряду-розряду акумулятора позитивно впливає на продовження його ресурсу, що призводить до приросту кількості повних циклів заряду- розряду. Власники електромобілів з запасом ходу, більшим їхнього добового пробігу, можуть використовувати не повний цикл акумуляторної батареї, а частковий, залежно від потреб, тим самим значно продовжуючи її ресурс. Частковий цикл може знаходитися в різних діапазонах рівня заряду, і вибір цього діапазону також впливає на ресурс акумулятора.

На ресурс акумуляторної батареї електромобіля також може суттєво впливати система BMS, оскільки дисбаланс між величинами напруги комірок призводить до використання акумулятора у ширшому діапазоні рівня заряду: комірки з напругою, вищою за середню, довше працюють у більш високому діапазоні рівня заряду, а з меншою напругою — у більш низькому. Отже, необхідно шукати шляхи модернізації BMS для поліпшення показників точності вимірювання напруги комірок та струму балансування.

Вплив умов реалізації зарядо-розрядних циклів акумуляторних батарей на їхній ресурс до втрати 10% ємності

		-			
DoD, %	Діапазон заряду батареї, %	Кількість циклів до втрати ємно- сті 10%	Запас ходу на одному заряді, км	Середній пробіг, тис. км	Приріст пробігу, %
100	100-0	700*	300	210	0
75	100-25	1000	225	225	7,1
60	100-40	1250	180	225	7,1
00	85-25	2000	180	360	71,4
50	75-25	1500	150	225	7,1
50	100-50	3000	150	450	114,3
30	75-45	5000	90	450	114,3
10	75-65	9000*	30	270	28,6

*Значення отримані авторами апроксимацією наявних даних через відсутність інформації в першоджерелі [20]

Надалі потрібно розробляти автоматичні системи, які без участі користувача прогнозуватимуть дальність поїздки й на основі цього регулювати доступну для користувача ємність шляхом автоматичного припинення заряджання електромобіля. Наприклад, якщо користувач у робочі дні їздить одним і тим самим маршрутом, то можна спрогнозувати необхідну для цього маршруту кількість енергії та зарядити в батарею у два рази більше, ніж необхідно для поїздки. У вихідні дні користувач може мати довгі поїздки або ж взагалі нікуди не виїжджати. Цю інформацію може збирати вбудована в електромобіль система, яка з часом буде все точніше підлаштовуватись під користувача. Також ця система має враховувати рельєф місцевості та погодні умови, беручи цю інформацію із мережі Інтернет. Для кращого результату, щоб пришвидшити навчання системи, необхідно надати можливість користувачеві налаштовувати її власноруч.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Скрибка Є. Електромобілі 2021: знову подвоїлись. *Нафторинок*, 28.03.2022. http://www.nefterynok.info/stati/ elektromobl-2021-znovu-podvolis.

2. Закат эпохи ДВС: Где и когда полностью запретят автомобили с дизельными и бензиновыми двигателями. *Autoconsulting*, 5.07.2019 http://www.autoconsulting.com.ua/ article.php?sid=43899

3. Granovskii M., Dincer I., Rosen M.A. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, vol. 159, iss. 2, 2006, pp. 1186–1193. https://doi.org/10.1016/j. jpowsour.2005.11.086

4. Guo J., Zhang X., Gu F., Zhang H., Fan Y. Does air pollution stimulate electric vehicle sales? Empirical evidence from twenty major cities in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 249, p.119372. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119372

5. Ota Y., Taniguchi H., Nakajima T. et al. Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, iss. 1, 2012, pp. 559–564. https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2167993

6. Albatayneh A., Assaf M., Alterman D., Jaradat M. Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, vol. 24, iss. 1, pp. 669–680. https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0041

7. Motoaki Y., Shirk M.G. Consumer behavioral adaption in EV fast charging through pricing. *Energy Policy*, vol. 108, 2017, pp. 178–183. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.051

8. Keil P., Schuster S. F., Wilhelm J. et al. Calendar aging of lithiumion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, vol. 163, no. 9, pp. A1872–A1880. https://doi.org/10.1149/2.0411609jes

9. Kabir M. M., Demirocak D. E. Degradation mechanisms in Li-ion batteries: a state-of-the-art review. *International Journal of Energy Research*, 2017, vol. 41, iss. 14, pp. 1963–1986. https://doi.org/10.1002/er.3762

10. Emma Woollacott. Electric cars: What will happen to all the dead batteries? *BBC.News*, 27.04.2021https://www.bbc.com/news/ business-56574779

11. Новицький О. На який реальний пробіг варто розраховувати, купуючи вживане авто. *AUTO.RIA*, 30.01. 2019. https://auto. ria.com/uk/news/first_auto/241867/na-kakoj-realnyj-probeg-stoitrasschityvat-pokupaya-b-u-avtomobil.html

12. Nissan leaf charging guide. *Pure-EV*, https://www.pure-ev. co.uk/nissan-leaf-charging/

13. Saldaña G., Martín J. I. S., Zamora I. et al. Empirical electrical and degradation model for electric vehicle batteries. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 155576–155589. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019477

14. Millner A. Modeling Lithium Ion battery degradation in electric vehicles. 2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, USA, Waltham, MA, 2010, pp. 349–356. https://doi.org/10.1109/ CITRES.2010.5619782

15. Zeng X., Li M., Abd El-Hady D. et al. Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles. *Advanced Energy Materials*, 2019, vol. 9, iss. 27. https://doi.org/10.1002/aenm.201900161

16. Miao Y., Hynan P., Jouanne von A., Yokochi A., Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 6, pp. 1074–1094. https://doi.org/10.3390/en12061074

17. Alaoui C. Solid-state thermal management for lithiumion EV batteries. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 98-107. https://doi.org/10.1109/ TVT.2012.2214246

18. Argue Ch. What 6,000 EV batteries tell us about EV battery health. *GEOTAB*, 7.08.2020. https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/

19. Han X., Lu L., Zheng Y. et al. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation*, 2019, vol. 1, 100005. https://doi.org/10.1016/j. etran.2019.100005

20. Xu B., Oudalov A., Ulbig A. et al. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 1131–1140. https://doi. org/10.1109/TSG.2016.2578950

Дата надходження рукопису до редакції 28.09 2023 р.

Опис статті для цитування:

Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Використання часткового зарядно-розрядного циклу акумуляторної батареї для збільшення її ресурсу. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3 – 4, с. 9 – 15. http://dx.doi.org/10.15222/ ТКЕА2023.3-4.09

Cite the article as:

Lipko D. O., Bondarenko O. F. Using partial charge-discharge cycle of battery to increase its lifespan. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3 – 4, pp. 9 – 15. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2023.3-4.09

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.09 UDC 621.355:621.311.61

D. O. LIPKO, O. F. BONDARENKO

Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

USING PARTIAL CHARGE-DISCHARGE CYCLE OF BATTERY TO INCREASE ITS LIFESPAN

The work investigates a way to extend the lifespan of electric vehicle battery packs. Currently, there is a notable absence of solutions for recycling and disposal of lithium-based battery packs. Therefore, investigating possible ways to prolong the lifespan of existing electric vehicle battery packs becomes crucial to delay their disposal and allow more time to find new effective recycling solutions. This study analyzes the average daily mileage of vehicles in Ukraine and other countries, revealing that it does not exceed 50 km per day. This mileage is significantly lower than the full charge-discharge cycle range of any electric vehicle traction battery pack. The authors investigated the impact of limiting the depth of discharge of the battery pack on its lifespan and found that by restricting the depth of discharge to 50%, the battery lifespan could increase by 20% and more. Statistical data from other scientists were gathered and organized to analyze the influence of the depth of discharge on the battery lifespan across different charge levels during the charge-discharge cycle. It was shown that when using battery packs with the same depth of discharge but in different charge-discharge cycle ranges, the batteries degrade differently. In conclusion, it was noted that to increase the battery lifespan, it is essential to keep it in the optimal charge level range for as long as possible. The paper provides recommendations for identifying this optimal charge level range. It proposes ways for upgrading electric vehicle control systems that can increase the lifespan of their traction battery pack without setting substantial restrictions for users.

Keywords: electric vehicle, battery, state of charge, partial cycle, battery lifespan.

REFERENCES

1. Skrybka Ye. [*Electric vehicles 2021: doubled again*]. *NaftoRynok*, 28 March 2022. http://www.nefterynok.info/stati/ elektromobl-2021-znovu-podvolis (Ukr)

2. [ICE Sunset: Where and when diesel and gasoline engines will be completely banned]. *Autoconsulting*, 5.07.2019 http://www. autoconsulting.com.ua/article.php?sid=43899 (Rus)

3. Granovskii M., Dincer I., Rosen M.A. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, vol. 159, iss. 2, 2006, pp. 1186–1193. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.11.086

4. Guo J., Zhang X., Gu F., Zhang H., Fan Y. Does air pollution stimulate electric vehicle sales? Empirical evidence from twenty major cities in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 249, p.119372. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119372

5. Ota Y., Taniguchi H., Nakajima T. et al. Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, iss. 1, 2012, pp. 559–564. https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2167993

6. Albatayneh A., Assaf M., Alterman D., Jaradat M. Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles. *Environmental and Climate Technologies*, 2020, vol. 24, iss. 1, pp. 669–680. https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0041

7. Motoaki Y., Shirk M.G. Consumer behavioral adaption in EV fast charging through pricing. *Energy Policy*, vol. 108, 2017, pp. 178–183. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.051

8. Keil P., Schuster S. F., Wilhelm J. et al. Calendar aging of lithiumion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, vol. 163, no. 9, pp. A1872–A1880. https://doi.org/10.1149/2.0411609jes

9. Kabir M. M., Demirocak D. E. Degradation mechanisms in Li-ion batteries: a state-of-the-art review. *International Journal of Energy Research*, 2017, vol. 41, iss. 14, pp. 1963–1986. https://doi.org/10.1002/er.3762

10. Emma Woollacott. Electric cars: What will happen to all the dead batteries? *BBC.News*, 27.04.2021https://www.bbc.com/news/ business-56574779

11. Novytskyi O. [*What real mileage should you expect when buying a used car*]. *AUTO.RIA*, 30.01. 2019. https://auto.ria.com/uk/news/first_auto/241867/na-kakoj-realnyj-probeg-stoit-rasschityvat-pokupaya-b-u-avtomobil.html

12. Nissan leaf charging guide. *Pure-EV*, https://www.pure-ev. co.uk/nissan-leaf-charging/

13. Saldaña G., Martín J. I. S., Zamora I. et al. Empirical electrical and degradation model for electric vehicle batteries. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 155576–155589. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019477

14. Millner A. Modeling Lithium Ion battery degradation in electric vehicles. 2010 *IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply*, USA, Waltham, MA, 2010, pp. 349–356. https://doi.org/10.1109/CITRES.2010.5619782

15. Zeng X., Li M., Abd El-Hady D. et al. Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles. *Advanced Energy Materials*, 2019, vol. 9, iss. 27. https://doi.org/10.1002/aenm.201900161

16. Miao Y., Hynan P., Jouanne von A., Yokochi A., Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 6, pp. 1074–1094. https://doi.org/10.3390/en12061074

17. Alaoui C. Solid-state thermal management for lithium-ion EV batteries. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 98–107. https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2214246

18. Argue Ch. What 6,000 EV batteries tell us about EV battery health. *GEOTAB*, 7.08.2020. https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/

19. Han X., Lu L., Zheng Y. et al. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation*, 2019, vol. 1, 100005. https://doi.org/10.1016/j. etran.2019.100005

20. Xu B., Oudalov A., Ulbig A. et al. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 1131–1140. https://doi.org/10.1109/ TSG.2016.2578950

УДК 621.31

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.16

К. ф.-м. н. В. Р. КОЛБУНОВ, д. ф.-м. н. О. С. ТОНКОШКУР, С. В. МАЗУРИК, к. ф.-м. н. О. Ю. ЛЯШКОВ, д. т. н. Л. В. НАКАШИДЗЕ

Україна, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара E-mail: kolbunov vadim@i.ua

ЗАХИСТ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ВІД ПЕРЕГРІВУ ЗА ДОПОМОГОЮ КРИТИЧНИХ ТЕРМОРЕЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ВАНАДІЮ

Досліджено можливості використання критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію для запобігання локальних перегрівів у фотоелектричних компонентах сонячних батарей. Терморезисторні елементи виробляли зі склокерамічних матеріалів на основі діоксиду ванадію та ванадій-фосфатного скла системи $V_2O_5 - P_2O_5$, в яких стрибкоподібно, на півтора-два порядки, змінюється величина електричного опору в області температури 70°С. Результати досліджень показали, що розглянуті елементи захисту можуть функціонувати як багаторазові (самовідновлювальні) запобіжники електротеплових перевантажень в сонячних батареях, які реагують безпосередньо на досягнення граничної для експлуатації фотоелектричних елементів температури.

Ключові слова: критичний терморезистор, діоксид ванадію, фотоелектричний елемент, локальний перегрів.

Одним із найбільш небажаних джерел суттєвого погіршення надійності фотоелектричних компонентів сонячних батарей є виникнення перегрівів, пов'язаних із електричним навантаженням. Фізичними причинами таких ситуацій можуть бути пошкодження корозією в процесі експлуатації складових елементів, приховані виробничі дефекти або деградація ізоляції під дією навколишнього середовища [1, 2].

На сьогодні існує низка методів і засобів запобігання появі електричних перевантажень: байпасні (обвідні) діоди, резисторні дільники, активні обвідні транзисторні перемикачі [3-8]. Найпоширенішим технічним рішенням цих проблем є використання додаткових елементів — байпасних діодів [3—5]. Однак практика встановлення таких діодів паралельно ланцюжку сонячних елементів показала, що "гарячі плями" все ж таки виникають, і це призводить до прискореного погіршення характеристик сонячних батарей. Обвідні діоди найбільш ефективні для запобігання виникненню "гарячих плям" у разі коротких послідовностей сонячних елементів, але такі конструкції не застосовуються в сучасних панелях з економічних міркувань. З іншого боку, вони, як і інші згадані схемотехнічні рішення, реагують в основному на електричні перевантаження (як правило, на перенапругу), а підвищення температури не є для них вхідним контрольованим параметром. Елементами захисту, які реагують безпосередньо на підвищення температури, можуть бути, наприклад, терморезистори на основі матеріалів з фазовим переходом «метал — напівпровідник» (ФПМН), розглянуті теоретично в [9]. Ці твердотільні елементи, так звані критичні терморезистори, мають температурну залежність електричної провідності, що стрибкоподібно зростає при досягненні температури фазового переходу T_t . Конструктивно тепловий захист реалізується шляхом доповнення окремого фотоелектричного елемента терморезисторним елементом захисту, що знаходиться з ним у тепловому контакті. При їх паралельному підключенні та нагріванні фотоелектричного елемента останній може бути "закорочений" терморезистором внаслідок його переходу з низькопровідного у високопровідний стан.

Слід зазначити, що такі терморезистори мають широке застосування у реалізації пристроїв автоматичного контролю, перемикачів та обмежувачів потужності, термоелектричних перетворювачів електричних та оптичних сигналів тощо. Однак відомостей про їхнє використання у сонячних батареях у літературі нами не знайдено.

Нами проведено експериментальне обґрунтування можливостей та перспектив використання терморезисторів на основі діоксиду ванадію для запобігання перегріву у колах фотоелектричних систем сонячних батарей. У цій роботі наводяться результати досліджень впливу температури на електричні характеристики моделі фотоелектричного модуля, що являє собою систему послідовно з'єднаних фотоелектричних елементів з додатковим терморезисторним елементом на основі діоксиду ванадію, що знаходяться в тепловому контакті.

Електричні властивості терморезистора на основі діоксиду ванадію

Для виготовлення терморезисторного елемента використовувалися склокерамічні матеріали на основі діоксиду ванадію і ванадій-фосфатного скла системи $V_2O_5 - P_2O_5$, описані в [10]. Як і у монокристалічному діоксиді ванадію, в цих матеріалах відбувається ФПМН, ініційований

зміною температури, що супроводжується різкою зміною теплофізичних, електричних та магнітних властивостей (зміна електроопору досягає декількох порядків). Температура фазового переходу становить $T_t \approx 68^{\circ}$ С. За температур, нижчих T_t , вказані склокерамічні матеріали мають напівпровідникові властивості, вищих $T_t \longrightarrow 0$

На **рис.** 1, *а* наведено температурну залежність опору зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію, яка демонструє зазначений стрибок опору в області температури 70°С, пов'язаний з ФПМН. При отриманні цієї залежності швидкість зростання температури не перевищувала 1°С/хв, а похибка виміру температури була не більшою за ±0,5°С.

Електронні пристрої на основі таких матеріалів можуть працювати при високих електричних струмах. Це дозволяє створювати елементи, відомі як порогові перемикачі та терморезистори. Критичні терморезистори, що поєднують властивості теплового реле і терморезистора з від'ємним температурним коефіцієнтом опору, можуть, зокрема, використовуватися для ефективного захисту від перегрівів пристроїв електронної техніки [11, 12].

На рис. 1, б наведено вольт-амперну характеристику (**BAX**) цього зразка. На ній можна побачити іншу особливість цих матеріалів — наявність гістерезису. Перемикання зразка з низькопровідного стану у високопровідний відбувається за більшої напруги, ніж зворотне перемикання. Використовуваний



Рис. 1. Типова температурна залежність електричного опору ρ (*a*) та ВАХ (*б*) зразка склокераміки на основі діоксиду ванадію (на *б* стрілки вказують напрямок зміни напруги)

Методика проведення досліджень

Для реалізації термісторного захисту фотоелектричних елементів сонячних батарей від перегріву пропонується паралельне включення фотоелектричного елемента (**PV**) і терморезистора на основі склокераміки діоксиду ванадію з ФПМП із забезпеченням їх теплового контакту (**рис. 2, 3**). Терморезистори під час експерименту закріплювали до тильного боку фотоелементів. Для стійкої теплопередачі поверхні терморезистора та фотоелемента, що знаходяться в контакті, змащувалися кремнійорганічною теплопровідною пастою КПТ-8. У дослідженнях використовувалися PV-елементи з полікристалічного кремнію розмірами 150×50 мм.



Рис. 2. Схематичне зображення досліджуваної структури: 1 — *p*-*n*-перехід фотоелектричного елемента; 2, 3 просвітлювальне покриття та металева сітка (електрод) фотоелектричного елемента; 4 — шар ізолятора; 5 електропровідні шари



Рис. 3. Еквівалентна електрична схема досліджуваного сонячного модуля з захистом від перегріву

Для вимірювання ВАХ та кривої потужності P(U) використовувалася відома вимірювальна схема вольтметра-амперметра [6, 11]. Роль навантаження виконував змінний резистор, джерела світла — імітатор сонячного випромінювання, який моделює умови AM1,5. Для досліджень за підвищеної температури модель сонячної батареї поміщалася в розігрітий термостат, а після кожного такого вимірювання охолоджувалась до кімнатної температури у вільному режимі.

Результати досліджень та їх обговорення

На **рис. 4** наведено отримані за кімнатної температури характеристики моделі сонячної батареї, яка складається з чотирьох послідовно включених PVелементів. Тут видно, що наявність обвідного терморезисторного елементу в електричній схемі моделі сонячної батареї не впливає на її фотоелектричні характеристики у разі штатного температурного режиму всіх PV-елементів.



Рис. 4. ВАХ моделі сонячного модуля без (1) та з (2) терморезисторним елементом в умовах штатного температурного режиму всіх РV-елементів





На рис. 5 представлені характеристики моделі сонячної батареї у разі штатного температурного режиму всіх РV-елементів у порівнянні з випадками, коли температура одного з кіл «PV-елемент — терморезистор» вища за температуру переходу терморезистора у високопровідний (металевий) стан. На практиці такий стан може досягатися і через збільшення температури зазначеного кола, і через підігрів його електричним струмом. Як видно, така відмова (перегрів) окремих елементів призводить до тих самих результатів, що і при використанні механічного закорочування (викидання відповідного елемента або елементів із послідовного ланцюга). Результат той самий — зниження генерованої напруги та потужності.

Висновки

Результати проведених досліджень дозволяють зробити висновок, що пропоновані елементи захисту можуть функціонувати як багаторазові (самовідновлювальні) запобіжники електротеплових перевантажень в сонячних батареях, які реагують безпосередньо на досягнення граничної температури під час експлуатації фотоелектричних елементів. Застосування обвідних критичних терморезисторів в цьому випадку є ефективним з точки зору реалізації вбудованого захисту, що реагує безпосередньо на локальну температуру у разі перегріву фотоелемента, а також на перегріви, пов'язані з іншими причинами.

Пропонований підхід для запобігання перегріванню фотоелектричних елементів сонячних батарей, до надійності яких висуваються підвищені вимоги, представляється перспективним з огляду на відносну простоту технології виготовлення та невисоку вартість розглянутих склокерамічних матеріалів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Aghaei M., Fairbrother A., Gok A. et al. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 159, 112160. https://doi.org/10.1016/j. rser.2022.112160

2. Goudelis G., Lazaridis P. I., Dhimish M. A review of models for photovoltaic crack and hotspot prediction. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 12, 4303. https://doi.org/10.3390/en15124303

3. Kim K. A., Krein P. T. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, vol. 5, iss. 5, pp. 1435–1441. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2444091

4. Dhimish M., Chen Zh. Novel Open-Circuit Photovoltaic Bypass Diode Fault Detection Algorithm. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2019, vol.9, iss. 6, pp. 1819–1827. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2940892

5. Lee Ch. G., Shin W. G., Lim J. R. et al. Analysis of electrical and thermal characteristics of PV array under mismatching conditions caused by partial shading and short circuit failure of bypass diodes. *Energies*, 2021, vol. 228, iss. 1, 119480. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119480

6. Guerriero P., Daliento S. A Power MOS based circuit for controlling the hot spot temperature in photovoltaic modules. 25th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 2019, Italy, Lecco, p. 1–5, https://doi.org/10.1109/ THERMINIC.2019.8923447

7. Tang S., Xing Y., Chen L. et al. Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels. *Solar Energy*, 2021, vol. 214, iss. 15, p.51–61. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.047

8. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydze L. V. et al. Application of polymer posistor nano-composites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Monograph. Primedia eLaunch, Boston, USA, 2021, 172 p. https://doi. org/10.46299/978-1-63972-054-5

9. Тонкошкур О.С., Іванченко О.В. Застосування шару на основі матеріалів з фазовим переходом «метал — напівпровідник» для електротеплового захисту сонячних елементів. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2021, № 3–4, с. 57–64. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2021.3-4.57

10. Колбунов В.Р., Тонкошкур О.С., Вашерук О.В. Електропровідність термочутливої склокераміки на основі нанороз-

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.16 UDC 621.31 мірного діоксиду ванадія. Т*ехнология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2022, № 1–3. С. 39-41. http://dx.doi.org/10.15222/ ТКЕА2022.1-3.39

11. Ke Y., Wang S., Liu G. et al. Vanadium dioxide: The multistimuli responsive material and its applications. *Nano-Micro Small*, 2018, vol. 14, iss. 39, 1802025. https://doi.org/10.1002/smll.201802025

12. Ивон А.И., Кузьменко Е.Н. Использование критических терморезисторов для защиты процессора от перегрева. Системные технологии, 2007, т. 2, № 49, с. 25–32.

> Дата надходження рукопису до редакції 7.05 2023 р.

V. R. KOLBUNOV, O. S. TONKOSHKUR, S. V. MAZURIK, A. Yu. LYASHKOV, L.V. NAKASHYDZE

> Ukraine, Oles Honchar Dnipro National University E-mail: kolbunov vadim@i.ua

USING VANADIUM DIOXIDE CRITICAL THERMISTORS TO PROTECT SOLAR CELLS FROM OVERHEATING

The overheating caused by electrical loads is one of the essential factors impairing the reliability of photovoltaic components of solar cells. The most common technical solution to this problem is to use such additional elements as bypass diodes. However, the practice of installing such diodes in parallel with a chain of solar cells has shown that this approach does not eliminate hot spots completely, and thus characteristics of the solar cells deteriorate at a faster pace. One of the possible solutions to this problem is to use critical thermistors based on metal-semiconductor phase transition materials, such as vanadium dioxide. Structurally, such thermal protection is implemented by adding a separate photovoltaic element with a thermistor protection element that is in thermal contact with it. This study investigated the effectiveness of such a solution to prevent local overheating in photovoltaic components of solar cells. Glass-ceramic materials based on vanadium dioxide and vanadium-phosphate glass of the $V_2O_5 - P_2O_5$ system were used as thermistor elements, which abruptly change the electrical resistance by 1.5-2.0 orders of magnitude in the temperature range around 70°C. The research results showed that the considered protective elements can function as reusable (self-healing) fuses against electrothermal overloads in solar batteries. Considering the relative simplicity and low cost of the manufacturing technology of glass-ceramic materials with a metal-semiconductor phase transition, the described approach to preventing overheating of photovoltaic cells of solar cells in situations with higher reliability requirements appears to be promising.

Keywords: critical thermistor, vanadium dioxide, photovoltaic element, local overheating.

REFERENCES

1. Aghaei M., Fairbrother A., Gok A. et al. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 159, 112160. https://doi. org/10.1016/j.rser.2022.112160

2. Goudelis G., Lazaridis P. I., Dhimish M. A review of models for photovoltaic crack and hotspot prediction. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 12, 4303. https://doi.org/10.3390/en15124303

3. Kim K. A., Krein P. T. Reexamination of photovoltaic hot spotting to show inadequacy of the bypass diode. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2015, vol. 5, iss. 5, pp. 1435–1441. https://doi. org/10.1109/JPHOTOV.2015.2444091

4. Dhimish M., Chen Zh. Novel Open-Circuit Photovoltaic Bypass Diode Fault Detection Algorithm. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2019, vol. 9, iss. 6, pp. 1819–1827. https://doi.org/10.1109/ JPHOTOV.2019.2940892

5. Lee Ch. G., Shin W. G., Lim J. R. et al. Analysis of electrical and thermal characteristics of PV array under mismatching conditions caused by partial shading and short circuit failure of bypass diodes. *Energies*, 2021, vol. 228, iss. 1, 119480. https://doi.org/10.1016/j. energy.2020.119480

6. Guerriero P., Daliento S. A Power MOS based circuit for controlling the hot spot temperature in photovoltaic modules. 25th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, 2019, Italy, Lecco, pp. 1–5, https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923447 7. Tang S., Xing Y., Chen L. et al. Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels. *Solar Energy*, 2021, vol. 214, iss. 15, pp. 51–61. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.047

8. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydze L. V. et al. *Application of polymer posistor nano-composites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Monograph.* Primedia eLaunch, Boston, USA, 2021, 172 p. https://doi.org/10.46299/978-1-63972-054-5

9. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V. Using a layer based on materials with a metal to semiconductor phase transition for electrothermal protection of solar cells. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2021, no 3–4, pp. 57–64. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.57 (Ukr)

10. Kolbunov V. R., Tonkoshkur O. S., Vasheruk O.V. Electrical conductivity of thermosensitive glass-ceramics based on nanosized vanadium dioxide. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2022, no 1–3, pp. 39–43. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.39 (Ukr)

11. Ke Y., Wang S., Liu G. et al. Vanadium dioxide: The multistimuli responsive material and its applications. *Nano-Micro Small*, 2018, vol. 14, iss. 39, 1802025. https://doi.org/10.1002/smll.201802025

12. Ivon A.I., Kuz'menko Ye.N. [Using critical thermistors to protect the processor from overheating]. *System Technologies*, 2007, vol. 2, no. 49, pp. 25–32. (Rus)

Опис статті для цитування:

Колбунов В. Р., Тонкошкур О. С., Мазурик С. В., Ляшков О. Ю., Накашидзе Л. В. Захист сонячних батарей від перегріву за допомогою критичних терморезисторів на основі діоксиду ванадію. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4, с. 16–19. http://dx.doi.org/10.15222/ TKEA2023.3-4.16

Cite the article as:

Kolbunov V. R., Tonkoshkur O. S., Mazurik S. V., Lyashkov A. Yu., Nakashydze L. V. Using vanadium dioxide critical thermistors to protect solar cells from overheating. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 16–19. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2023.3-4.16

Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4

УДК 621.383.51

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.20

К. ф.-м. н. В. В. ЧЕРНЕНКО, д. ф.-м. н. В. П. КОСТИЛЬОВ, к. т. н. Р. М. КОРКІШКО, Б. Ф. ДВЕРНІКОВ, PhD Д. В. ПЕКУР, к. т. н. Ю. В. КОЛОМЗАРОВ, к. т. н. В. І. КОРНАГА, д. т. н. В.М. СОРОКІН

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України E-mail: vvch1988@gmail.com

КОНЦЕНТРАТОРНИЙ ФОТОЕНЕРГЕТИЧНИЙ МОДУЛЬ НА ОСНОВІ КРЕМНІЄВИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Представлено конструкторсько-технологічні рішення щодо виготовлення сонячного фотоенергетичного модуля (ФМ) на основі кремнієвих фотоперетворювачів із тиловим розміщенням колекторного р–п-переходу та обох контактних електродів. Розроблений ФМ призначений для використання в сонячній електростанції з концентратором. Проведено експериментальні та теоретичні дослідження фотоелектричних характеристик виготовленого ФМ в умовах неконцентрованого та слабоконцентрованого сонячного випромінювання. Встановлено, що використані сонячні фотоперетворювачі мають досить низький послідовний опір, а сонячний ФМ — високу ефективність фотоелектричного перетворення.

Ключові слова: кремнієвий фотоперетворювач, контактні електроди, тилове розташування, фотоенергетичний модуль, сонячне випромінювання, концентратор.

Актуальність досліджень екологічно чистих, поновлюваних фотовольтаїчних джерел енергії не викликає сумніву. Але ані високі темпи зростання виробництва промислових фотоелектричних модулів (Φ M) для прямого перетворення енергії Сонця в електричну, ані зниження їх вартості поки що не можуть забезпечити суттєві конкурентні переваги Φ M порівняно з традиційними методами отримання енергії. Одним зі шляхів розвитку тут є підвищення ефективності процесів фотоелектричного перетворення для зменшення вартості виробництва одиниці енергії [1, 2].

Одним з ефективних методів зменшення вартості виробництва одиниці енергії є використання геліоенергетичних установок з концентраторами, які фокусують на фотоперетворювач (ФП) невеликої площі сонячне випромінювання, зібране з більшої площі, та забезпечують значно вищий рівень енергетичної освітленості, ніж при використанні натурного неконцентрованого сонячного випромінювання. При цьому збільшується вихідна потужність фотоперетворювача та знижується вартість отриманої енергії, адже не потрібно використовувати багато відносно дорогих фотоперетворювачів, біля половини вартості яких складає вартість напівпровідникового матеріалу, з якого вони виготовляються. В таких геліоенергетичних установках можуть використовуватися концентратори різного типу: параболо-циліндричні, сферичні, на основі лінз, дзеркал тощо [3, 4].

При створенні концентраторних геліоенергетичних установок необхідно розв'язати дві важливі зада-

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках грантового дослідницького проєкту №2022.01/0037. чі: мінімізувати послідовний опір та ефективно відвести тепло від напівпровідникового фотоперетворювача. Важливість охолодження фотоперетворювача обумовлюється надмірним його нагрівом при освітленні концентрованим сонячним опроміненням, що призводить до зниження ефективності фотоелектричного перетворення в цілому [5–7]. Крім того, для забезпечення якісної концентрації сонячного випромінення та фокусування його на фотоприймальну поверхню фотоперетворювача вкрай важливо забезпечити точну орієнтацію установки на Сонце, що зазвичай досягається використанням автоматичних систем орієнтації.

Метою цієї роботи було розроблення необхідних конструктивно-технологічних рішень і виготовлення спеціалізованого фотоенергетичного модуля, призначеного для використання в складі геліоенергетичної установки з параболо-циліндричним концентратором, та дослідження параметрів і характеристик цього модуля.

Конструктивно-технологічні особливості фотоенергетичного модуля

Для досягнення поставленої мети було розроблено та створено [8, 9] геліоенергетичну установку з параболо-циліндричним концентратором, показану на **рис. 1**. Установка має систему автоматичної орієнтації на Сонце і забезпечує приблизно 20-кратну концентрацію сонячного випромінювання в робочій зоні, де має розміщуватись фотоенергетичний модуль.

Для ефективної роботи в складі концентраторного ФМ фотоперетворювач повинен мати не лише високе значення коефіцієнта корисної дії, але й низький послідовний опір, негативний вплив якого зна-



Рис. 1. Концентраторна геліоенергетична установка (1) з місцем для встановлення фотоенергетичного модуля (2)

чно зростає при збільшенні величини струму короткого замикання ФП внаслідок концентрації сонячного випромінювання. Дослідження наявних на ринку фотоперетворювачів різних типів показали, що зазначеним критеріям відповідають кремнієві ФП фірми SunPower з тиловим розміщенням колекторного переходу та обох контактних електродів [10]. Завдяки розташуванню робочого колекторного переходу біля тилової поверхні дещо зменшиться його нагрів при концентрованому сонячному опроміненні, а монтаж на металевий радіатор забезпечить кращий відвід тепла від зони розташування робочого переходу. Оскільки для зменшення негативного впливу послідовного опору необхідно зменшувати величину струму через ФП, було запропоновано та використане таке конструктивне рішення: кілька фотоперетворювачів розміром 125×125 мм² розрізали на смужки розміром 125×16,7 мм², з яких вибирали дев'ять, і послідовно з'єднували їх для виготовлення ФМ.

Фотоенергетичний модуль для концентраторної геліоенергетичної установки був зібраний на ребристому алюмінієвому радіаторі, який додатково охолоджувався вентилятором. На плоску поверхню цього радіатора кріпилася алюмінієва оксидована пластина з дев'ятьма з'єднаними методом пайки фотоперетворювачами. Для зменшення теплового опору кріплення ФП до алюмінієвої пластини, як і кріплення цієї пластини до плоскої поверхні радіатора, здійснювалось через тонкий шар теплопровідної пасти. Зазори між ФП після розміщення на алюмінієвій пластині були не більше 0,5 мм.

Площа фронтальної поверхні виготовленого ФМ складала $0,42 \times 0,05 = 0,021 \text{ м}^2$, а його фронтальної фотоприймальної (заповненої фотоперетворювачами) поверхні — $0,375 \times 0,05 = 0,01875 \text{ м}^2$. Створення фотоенергетичного модуля саме з такими розмірами обумовлювалося розмірами зони концентрації сонячного випромінювання геліоенергетичної установки (рис. 1). Контактні площадки ФМ формувались на його периферії поза межами ділянки розташування фотоперетворювачів. З фронтальної сторони поверх-





Рис. 2. Фотоенергетичний модуль для геліоенергетичної установки

ня ФМ з фотоперетворювачами була захищена склом товщиною 2 мм, яке кріпилося за допомогою клею СКТН і додатково фіксувалося на краях притискними пластинами. Фото виготовленого фотоенергетичного модуля наведено на **рис. 2**.

Фотоелектричні характеристики створеного модуля

Фотоелектричні характеристики виготовленого ФМ в умовах АМ1,5 досліджувалися на базі сертифікованого Центру випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України. Результати вимірювань світлових вольт-амперних характеристик (**BAX**) виготовленого ФМ наведено на **рис. 3**, а визначені з них параметри — в **таблиці**.



Рис. 3. Світлові ВАХ виготовленого фотоенергетичного модуля за різного рівня енергетичної освітленості P_L (у Вт/м²): 1 - 924; 2 - 1135; 3 - 1543

Фотоелектричні параметри виготовленого модуля площею S = 0,021 м² в умовах різного рівня енергетичної освітленості P₁

	5				
Параметр	P_L , BT/m ²				
Параметр	924	1135	1543		
Струм короткого замикання I _{КЗ} , А	0,749	0,912	1,195		
Напруга розімкненого кола $V_{\rm PK}$, В	6,100	6,190	6,270		
Максимальна вихідна електрична потужність <i>P</i> _M , Вт	3,310	4,040	5,340		
Фотострум в точці максимальної потужності $I_{\rm M}$, А	0,653	0,798	1,053		
Напруга в точці максимальної по- тужності $V_{\rm M}, {\rm B}$	5,060	5,060	5,070		
Коефіцієнт форми ВАХ K_{ϕ}	0,730	0,730	0,720		
Ефективність η, %	17,06	16,95	16,48		

Для визначення параметрів еквівалентної схеми фотоперетворювача отримані експериментально результати були промодельовані з використанням одно- та двоекспоненціальної моделей опису світлових BAX [11, с. 15, 20], а саме:

$$I = I_{\phi} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q\left(V + I \cdot R_s\right)}{A \cdot kT}\right) - 1 \right] - \frac{I \cdot R_s + V}{R_{sh}}; \quad (1)$$

$$I = I_{\phi} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q\left(V + I \cdot R_s\right)}{A_1 \cdot kT}\right) - 1 \right] - \frac{I \cdot R_s + V}{R_{sh}}; \quad (2)$$

де I, I_{ϕ} — струм та фотострум відповідно; I_0, I_{01}, I_{02} — струми насичення зворотно-зміщеного *p*-*n*-переходу; q — заряд електрона;

- V напруга;
- *v* напруга,

R_s, *R_{sh}* — послідовний і шунтувальний опір відповідно; *A*, *A*₁, *A*₂ — фактори неідеальності *p*–*n*-переходу;

- k -стала Больцмана;
 - к стала Больцма Т

T — температура.

Для випадків якісного узгодження експериментальних і теоретичних світлових ВАХ двоекспоненціальна модель (2) дає такі параметри еквівалентної схеми фотоперетворювача: $A_1 = 1, A_2 = 2, R_{sh} = 525$ Ом, $R_s = 0,3$ Ом, $I_{01} = 1,1 \cdot 10^{-12}$ А, $I_{02} = 7,8 \cdot 10^{-7}$ А, тоді як одноекспоненціальна модель дає значення A = 2 (**рис. 4**).

Визначене значення фактора неідеальності ВАХ фотоенергетичного модуля свідчить про реалізацію високого рівня збудження, за якого концентрація надлишкових носіїв заряду значно вища, ніж концентрація легувальної домішки, і про високі значення часу життя неосновних носіїв у базі фотоперетворювача. Такий результат узгоджується з наданими компанією SunPower параметрами ФП, які виготовляються на основі високоякісного кремнію зонної плавки *n*-типу провідності з часом життя 1–2 мс.



Таким чином, проведені дослідження дозволили розробити необхідні конструктивно-технологічні рішення та виготовити фотоенергетичний модуль для використання у складі геліоенергетичної установки з параболо-циліндричним концентратором.

Результати, отримані на першому етапі досліджень в умовах неконцентрованого і слабо (1,5-кратно) концентрованого сонячного опромінення, показали, що використані фотоперетворювачі мають досить низькі значення послідовного опору, а виготовлений сонячний модуль — достатньо високу ефективність фотоелектричного перетворення.

Надалі планується провести випробування виготовленого фотоенергетичного модуля в умовах концентрованого до 20-кратної величини натурного сонячного опромінення з подальшим визначенням напрямків поліпшення його характеристик.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Green M.A. Photovoltaic technology and visions for the future. *Progress in Energy*, 2019, vol. 1, no. 1, p. 1–13. https://doi. org/10.1088/2516-1083/ab0fa8

2. Augusto A., Karas J., Balaji P. et al. Exploring the practical efficiency limit of silicon solar cells using thin solar-grade substrates. *Journal of Material Chemistry A*, 2020, vol. 8, p.16599–16608. https://doi.org/10.1039/D0TA04575F

3. Willeke G. High concentration photovoltaics — state-of-the-art and novel concepts. *Proceedings of 3-rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion*, Japan, Osaka, 2003, vol. 3, S30-A5-04.

4. Lovegrove K., Stein W. Concentrating solar power technology: principles, developments, and applications, 2nd Edition. Elsevier Science, Woodhead Publ., 2020, 832 p.

5. Sachenko A.V., Kostylyov V.P., Korkishko R.M. et al. Peculiarities of the temperature dependences of silicon solar cells illuminated with light simulator. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2015, vol. 18, no. 3, p. 259–266. https://doi.org/10.15407/spqeo18.03.259

6. Singh P., Ravindra N.M. Temperature dependence of solar cell performance — an analysis. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, vol. 101, p. 36–45. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.02.019

7. Sharaf M., Yousef M.S., Huzayyin A.S. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, p. 26131–26159. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9

8. Костильов В.П., Дверніков Б.Ф., Коркішко Р.М. та ін. Конструктивно-технологічні особливості і фотоенергетичні характеристики сонячного модуля для геліоенергетичної установки з параболо-циліндричним концентратором. *IX Международная научная конференция "Функциональная база наноэлектроники*": сборник научных трудов. Украина, Харьков — Одесса, 2017, с. 141–144.

9. Коркішко Р.М. Удосконалення технології виготовлення кремнієвих сонячних елементів для роботи при підвищених рівнях збудження. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України, 2018, 22 с.

10. De Ceuster D., Cousins P., Rose D. et al. Low cost, high volume production of >22% efficiency silicon solar cells. *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC 2007)*, Italy, Milan, 2007, p. 816–819.

11. Раушенбах Г.С. Справочник по проектированию солнечных батарей. Москва, Энергоатомиздат, 1983, 360 с.

Дата надходження рукопису до редакції 21.11 2023 р.

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.20 UDC 621.383.51 V. V. CHERNENKO, V. P. KOSTYLYOV, R. M. KORKISHKO, B. F. DVERNIKOV, D. V. PEKUR, Yu. V. KOLOMZAROV, V. I. KORNAGA, V. M. SOROKIN

> Ukraine, Kyiv, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine E-mail: vvch1988@gmail.com

CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC MODULE BASED ON SILICON PHOTOCONVERTERS

The task of reducing the cost of an energy unit obtained by the photovoltaic method remains relevant. One of the effective methods of reducing the production cost of energy units is to use installations that concentrate solar irradiation. In this study, the authors develop design and technological solutions and use silicon backside contact photoconverters with a rear placement of the collector p-n-junction and both contact electrodes to make a solar photovoltaic module of the required size. This photovoltaic module with front surface dimensions of $0.42 \times 0.05 \text{ m}^2$ is intended for use in a solar power plant with the parabola-cylindrical concentrator.

The first stage of experimental and theoretical research of photovoltaic characteristics of the solar module is carried out in the conditions of unconcentrated and weakly concentrated solar irradiation. It is established that the used solar photoconverters have fairly low values of the series resistance and the solar photovoltaic module has a sufficiently high efficiency of the photovoltaic conversion. It is planned to further test the developed solar module in the conditions of natural sunlight irradiation concentrated 20-fold, which will allow determining the ways to improve its characteristics.

Key words: silicon backside contact photoconverters, solar photovoltaic module, concentrated solar irradiation.

REFERENCES

1. Green M.A. Photovoltaic technology and visions for the future. *Progress in Energy*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 1–13. https://doi. org/10.1088/2516-1083/ab0fa8

2. Augusto A., Karas J., Balaji P. et al. Exploring the practical efficiency limit of silicon solar cells using thin solar-grade substrates. *Journal of Material Chemistry A*, 2020, vol. 8, pp.16599–16608. https://doi.org/10.1039/D0TA04575F

3. Willeke G. High concentration photovoltaics — state-of-the-art and novel concepts. *Proceedings of 3-rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion*, Japan, Osaka, 2003, vol. 3, S30-A5-04.

4. Lovegrove K., Stein W. Concentrating solar power technology: principles, developments, and applications, 2nd Edition. Elsevier Science, Woodhead Publ., 2020, 832 p.

5. Sachenko A.V., Kostylyov V.P., Korkishko R.M. et al. Peculiarities of the temperature dependences of silicon solar cells illuminated with light simulator. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 259–266. https://doi.org/10.15407/spqeo18.03.259

6. Singh P., Ravindra N.M. Temperature dependence of solar cell performance — an analysis. *Solar Energy Materials & Solar*

Cells, 2012, vol. 101, pp. 36-45. https://doi.org/10.1016/j.sol-mat.2012.02.019

7. Sharaf M., Yousef M.S., Huzayyin A.S. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, pp. 26131–26159. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9

8. Kostylyov V.P., Dvernikov B.F., Korkishko R.M. et al. [Design and technological features and photovoltaic characteristics of a solar module for a solar energy installation with a parabolic-cylindrical concentrator]. *Proceedings of the IX International scientific conference* "Functional basis of nanoelectronics", Ukraine, Kharkov — Odesa, 2017, pp. 141–144. (Rus)

9. Korkishko R.M. [Improving of the technology of silicon solar cell manufacturing to work at increased levels of excitation] Cand. tech. sci. diss. abstr. Kyiv, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine, 2018, 22 p. (Ukr)

10. De Ceuster D., Cousins P., Rose D. et al. Low cost, high volume production of >22% efficiency silicon solar cells. *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC 2007)*, Italy, Milan, 2007, p. 816–819.

11. Rauschenbach H.S. *Solar cell array design handbook.* New York, Van Nostrand Reinhold Company publ., 1980, 549 p.

Опис статті для цитування:

Черненко В. В., Костильов В. П., Коркішко Р. М., Дверніков Б. Ф., Пекур Д. В., Коломзаров Ю. В., Корнага В. І., Сорокін В. М. Концентраторний фотоенергетичний модуль на основі кремнієвих фотоперетворювачів. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3-4, с. 20-23. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.20

Cite the article as:

Chernenko V. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M., Dvernikov B. F., Pekur D. V., Kolomzarov Yu. V., Kornaga V. I., Sorokin V. M. Concentrator photovoltaic module based on silicon photoconverters. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 20–23. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.20

УДК 621.311.243

Д. т. н. А. А. ЄФІМЕНКО, Л. І. ПРИСЯЖНЮК

Україна, Національний університет «Одеська політехніка» E-mail: bogachevalyuba523@gmail.com

МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗТАШУВАННЯ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

Запропоновано моделі розміщення сонячної батареї (або груп батарей у кластері) та метод оптимізації її положення відносно Сонця (кут нахилу та азимут) з метою максимізації генерованої електричної енергії та отримання більш рівномірної генерації потужності у часі. Пропоновані рішення дозволяють моделювати роботу сонячних батарей в різних умовах з використанням комп'ютерної системи Matlab на основі експериментальних досліджень.

Ключові слова: сонячна енергія, сонячні батареї, генерована енергія, кут нахилу, азимут, оптимізація орієнтації.

Ефективністю роботи будь-якої системи, що генерує енергію, є відношення кількості енергії до затрат протягом якогось проміжку часу, наприклад доби, місяця, року. Якщо говорити про сонячні електростанції, то кількість енергії, яку можна отримати, значною мірою залежить від того, яке положення займають сонячні батареї (СБ) та кластери СБ відносно Сонця, їх азимутального положення та нахилу до горизонту. З іншого боку, від положення СБ залежать і затрати на створення та експлуатацію таких електростанцій. При цьому можуть бути дві граничні ситуації:

 фіксоване положення сонячних батарей протягом всього року (або періоду експлуатації), за якого експлуатаційні затрати є мінімальними, але величина генерованої енергії не є максимально можливою;

— розташування СБ змінюється завдяки відстежуванню положення Сонця, в результаті чого можна досягти максимуму генерованої енергії, але затрати на створення та експлуатацію системи енергопостачання при цьому будуть досить великими.

Вирішення завдання, пов'язаного з розташуванням сонячних батарей, має сенс, якщо враховувати, що коливання величини виробленої електроенергії влітку може досягати 40%. В цьому і полягає суперечність між затратами на створення та експлуатацію сонячних електростанцій та величиною генерованої енергії, яку слід розв'язувати, спираючись на можливість отримання значного виграшу.

Пошук раціонального розташування СБ в місцях їх експлуатації є важливим завданням для проєктувальників сонячних електростанцій, оскільки з цим значною мірою пов'язана ефективність роботи батарей. Для цього широко використовуються різні методи оптимізації, і особливо важливим тут є врахування всієї множини різноманітних факторів. Одним з методів, що поєднують в собі зручність та коректність поширення на різні умови та кліматичні зони, є метод, заснований на врахуванні одночасно двох факторів, а саме кута нахилу та азимуту розташування сонячних батарей, і статистичних даних натурних випробувань для певної місцевості.

Проблему підвищення ефективності функціонування сонячних батарей можна розглядати з точки зору оптимізації різних складових енергетичних систем на базі фотоелектричного перетворення сонячної енергії. Цим питанням присвячується велика кількість досліджень, особливо з огляду на те, що сонячні фотоелектричні панелі стали технологією відновлюваної енергетики, яка зростає найшвидше серед інших джерел світової енергетичної потужності.

У роботі [1] розглядаються важливі питання оптимізації сонячної фотоелектричної енергії, пов'язані з типом сонячних елементів, зміною температури, відстеженням точки максимальної потужності, перетворенням енергії, ефективністю та параметрами охолодження. Це дослідження підтверджує актуальність вдосконалення методів оптимізації, основними цілями яких є максимізація генерованої електроенергії, мінімізація інвестицій, викидів, витрат на експлуатацію і технічне обслуговування та підвищення надійності системи. З іншого боку, питанням оптимізації, пов'язаним з орієнтацією сонячних батарей відносно Сонця, врахуванням місця і кліматичних зон та часового відстежування положень, тут не приділяється достатньої уваги.

З огляду на збільшення частки сонячної енергії в енергопостачанні актуальним стає пошук рішень, направлених на компенсацію коливань між попитом та пропозицією електроенергії протягом певного періоду часу. З цією метою у дослідженні [2] була проведена оцінка сонячного потенціалу вибраної території, й з урахуванням часової нестабільності енергетичної мікромережі обрано оптимальну орієнтацію сонячних панелей. Однак дослідження стосується окремого випадку мікромережі університетського кампусу.

В роботі [3] представлено новий підхід, заснований на історичних кліматичних даних вебсайту NREL, який надає погодинні дані про сонячну активність за більш ніж двадцятирічний період. Оскільки пропонована модель пропускає деякі зайві кроки, це робить її ефективною для визначення оптимальної орієнтації сонячних панелей, виходячи з бажаних цілей, таких як максимум отримуваної річної потужності чи забезпечення пікового попиту в певний час. Слід зазначити, що цей підхід не враховує можливості одночасного розташування в кластері сонячних батарей в різних положеннях, що могло б сприяти максимальній сонячній інсоляції.

Для конкретного розташування на Землі найкраща фіксована орієнтація фотоелектричної панелі може бути визначена шляхом досягнення максимального потоку сонячного випромінювання, що падає протягом року або певного визначеного періоду. З цією метою автори [4] використовують складну модель перенесення випромінювання в атмосфері для розрахунку прямого та розсіяного сонячного випромінювання, що падає на фотоелектричні сонячні панелі. Таким чином визначається найкращий кут нахилу панелі для максимального поглинання сонячного випромінювання за вибрані періоди. При цьому використовується чисельний метод Регула – Фалсі, щоб отримати кут нахилу, за якого похідна сонячної радіації (відносно кута нахилу) наближається до нуля. Крім того, враховується спектральний відгук типових кремнієвих комірок. З іншого боку, за даними авторів, кількість літератури щодо використання спектральних характеристик кремнієвих елементів для коригування сонячного випромінювання з метою покращення розрахунків є дуже обмеженою, якщо вона взагалі існує. Таким чином, це дослідження корисне в умовах відсутності результатів вимірювань або їх ненадійності.

Визначенню кута нахилу сонячної панелі з використанням різних методів оптимізації присвячено роботу [5]. Автори продемонстрували, що для максимального генерування енергії системою важливим є точне визначення кута нахилу, оптимального для конкретного місця розташування. Однак не менш важливим параметром при цьому є азимут розташування сонячної панелі, але зв'язок між цими параметрами тут не розглядається.

Крім сказаного вище, нещодавні дослідження показали, що ефективність перетворення сонячного світла в енергію залежить не тільки від кількості отриманого випромінювання. У роботі [6] автори запропонували модель оптимізації кута нахилу сонячної панелі з використанням алгоритмів машинного навчання, але не з точки зору максимізації отримуваного потоку випромінювання, а з метою максимальної ефективності перетворення енергії. З урахуванням різних факторів, таких як погода, рівень запиленості та рівень аерозолів, було побудовано п'ять моделей прогнозування для різних умов застосування. Використання найкращої з отриманих моделей дозволило одержати більший вихід електричної енергії, ніж у випадку застосування моделей пошуку оптимального кута. Проте у цій роботі також не враховується зв'язок кута нахилу та азимуту сонячної панелі.

На противагу цьому в роботі [7], наприклад, стверджується, що для підвищення ефективності роботи СБ найефективніше правильно визначати її азимут, а кут нахилу автори вважають другорядним фактором.

Значне підвищення ефективності сонячних панелей можна отримати за допомогою автоматичних сонячних трекерів, але для можливості широкомасштабного використання таких систем керування дуже важливо знайти недорогі та надійні рішення. Про це йдеться у статті [8], де запропоновано процедуро відстеження, засновану на диференціальному методі та спеціальному мікродетекторі, яка дозволяє повертати сонячні батареї із заходу на схід у діапазоні регулювання кута 0—180°. Таке рішення є окремим напрямком підвищення ефективності генерування електроенергії, яке супроводжується додатковими витратами на роботу трекерів та систем автоматичного слідкування і керування ними.

Сучасним напрямком сонячної енергетики, що швидко розвивається, є використання двосторонніх вертикально розташованих сонячних панелей. В багатьох інформаційних джерелах, наприклад [9, 10], наводиться інформація про суттєві переваги таких систем, зокрема про збільшення генерованої потужності до 30%. Воно може коливатися в широких межах і залежить від багатьох умов, серед яких багато факторів, що важко піддаються врахуванню і створюють труднощі при моделюванні. На сьогодні дослідницькі устаткування з вертикально розташованими сонячними панелями знаходяться у різних кліматичних умовах — від Іспанії до півночі Норвегії [10], а дослідження їхньої ефективності продовжується. Слід зазначити, що метод, який пропонується нами, за наявності експериментальних даних може сприяти формальному оцінюванню ефективності та оптимізації положення двосторонніх вертикально розташованих сонячних панелей.

Точність визначення кута нахилу сонячних батарей з точки зору максимізації генерування ними електричної енергії залежить, як зазначалося раніше, від умов проведення досліджень. Тому ціла низка робіт присвячена отриманню результатів з орієнтації СБ відповідно до конкретного регіону. Наприклад, в [11] питання досягнення більш ефективного генерування електроенергії досліджуються відносно умов Омана.

Крім сказаного, слід зазначити, що для якісної оптимізації параметрів розташування СБ не менш важливим завданням є також мінімізація необхідно-

го для створення математичних моделей обсягу випробувань [12].

Представлена робота присвячена розробленню моделей та алгоритмів для оптимізації положення сонячних батарей при їх фіксованому розташуванні з метою підвищення ефективності їх роботи, а саме генерування максимальної енергії впродовж визначеного часу, а також зменшення нерівномірності генерування електроенергії в часі. Це дасть можливість, з одного боку, збільшити кількість генерованої енергії без збільшення кількості батарей, а з іншого — зменшити ємність накопичувачів енергії в системах електропостачання.

Моделі та алгоритми оптимізації положення СБ

Окрім граничних рішень, описаних вище, можуть існувати також інші, наприклад:

 фіксоване розташування СБ однієї групи, але по-різному в групах кластера;

— сезонне фіксоване розташування СБ;

сезонне фіксоване розташування різних груп
 СБ у кластері тощо.

У будь-якому випадку потрібно знайти такий набір СБ і таке їх положення відносно Сонця, які б дозволяли генерувати максимальну потужність, що буде відповідати оптимальному рішенню.

Потужність СБ визначається залежністю

$$P=f(\alpha,\beta,t),\tag{1}$$

де α, β — кут нахилу та азимут СБ;

t — час світлового дня.

Але нас цікавить не миттєва потужність, яка постійно змінюється, а електрична енергія E, яку можливо отримати протягом світлового дня, сезону, року.

Математичну модель оптимізації можна представити як

$$E = \max \sum_{i=1}^{r} P_i t_i, \qquad (2)$$

де P_i — потужність, яка досягається в проміжку часу t_i ; r — кількість проміжків часу;

або як

$$E = \max \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt$$
(3)

за умови обмежень:

 $\alpha \subset \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\};\\ \beta \subset \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\},\$

$$p \subset \{p_1, p_2, ..., p_n\},$$

де *m*, *n* — кількість положе

де *m*, *n* — кількість положень за кутом місця та за азимутом, відповідно.

Величина потужності (а відповідно, і енергії), що генерується сонячними батареями, достатньо сильно коливається протягом світлового дня. Це є, в першу чергу, результатом мінливості сонячного випромінювання та зміни азимутального положення Сонця та СБ. Таке явище є суттєво негативним для систем сонячної енергетики, особливо автономних. Якщо припустити, що протягом світлового дня кількість споживаної енергії є більш-менш постійною величиною, то задля забезпечення акумулювання електричної енергії під час її максимальної генерації ємність акумуляторної батареї має бути надлишковою.

Ідеальною є залежність, коли генерована потужність є постійною в часі. Наблизитись до такої характеристики можна, використовуючи декілька СБ з різними залежностями P=f(t), що можна отримати завдяки різній орієнтації СБ. Але задача ускладнюється умовою досягнення при цьому максимальної потужності та, відповідно, енергії протягом заданого часу.

Розв'язання поставленої задачі оптимізації пропонується виконувати поетапно з розділенням на такі частини:

1) всі СБ масиву розташовуються в одному з можливих положень;

2) групи СБ у кластері розташовуються в різних положеннях для досягнення максимальної енергії генерування;

3) аналогічно п. 2, але тут додатковою умовою є вирівнювання величини генерованої енергії впродовж заданого проміжку часу, частіше за все протягом світлового дня, при цьому можуть бути різні пріоритети та обмеження, наприклад:

 – генерування максимальної енергії в умовах обмежень нерівномірності генерованої енергії в часі;

— мінімізація нерівномірності генерованої енергії у часі в умовах обмежень мінімального значення енергії протягом всього часу.

Загалом варіантів обмежень може бути достатньо багато, і їх потрібно обирати в конкретній роботі з огляду на поставлену задачу оптимізації. Слід зазначити, що одним з важливих обмежень є термін окупності.

Для всіх трьох частин початковими даними є множина значень генерованої енергії кожною СБ в різних положеннях.

Представимо множину положень матрицею

Зазначимо, що матричне представлення даних необхідне через використання для їх оброблення системи комп'ютерної математики Matlab [13, 14], ефективність якої обумовлена, в першу чергу, орієнтацією на матричні обчислювання.

Кожне положення СБ L_{ij} визначається комбінацією дискретних значень кута нахилу α_i та азимута β_j : $\alpha_i \subset \overline{1,m}; \ \beta_i \subset \overline{1,n}$.

Відповідно, матриця значень генерованої кожною СБ енергії впродовж проміжку часу від $t_{\rm n}$ (початок роботи) до $t_{\rm k}$ (кінець роботи) має вигляд

$$E = \begin{bmatrix} E_{11}, E_{12}, \dots, E_{1j}, \dots, E_{1n} \\ E_{21}, E_{22}, \dots, E_{2j}, \dots, E_{2n} \\ \dots \\ E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{ij}, \dots, E_{in} \\ \dots \\ E_{m1}, E_{m2}, \dots, E_{mj}, \dots, E_{mn} \end{bmatrix}.$$
(5)

Тобто це матриця з множиною значень електричної енергії E_{ij} , яка може бути згенерована СБ у кожному положенні L_{ij} . Ці дані можна вважати коректними для подальшого використання для конкретного типу СБ, місця розташування за широтою, а також дня чи якогось періоду або пори року.

Для формування матриці (5) пропонується метод, заснований на проведенні польових досліджень СБ та використанні можливостей комп'ютерної системи Matlab.

В результаті проведення польових вимірювань отримуємо дискретні значення напруги холостого ходу U_{xx} та струму короткого замикання $I_{\kappa 3}$ у кожному встановленому положенні L_{ij} сонячної батареї для дискретних значень часу $t_n, t_1, t_2, ..., t_{\kappa}$. Для зручності подальшої обробки ці значення приводяться до одного параметра потужності за відомою емпіричною формулою

$$P = 0.72 U_{\rm xx} I_{\rm K3}.$$
 (6)

Таким чином ми можемо отримати залежності потужності від часу P=f(t) за їхніми дискретними значеннями для положень L_{ii} при $\alpha_i \subset \overline{1,m}$; $\beta_i \subset \overline{1,n}$.

Щоб перейти від значень потужності до значень енергії, які відповідають матриці (5), скористаємося комп'ютерною системою Matlab. Для цього виконаємо такі дії:

 апроксимація табличних даних, що виражається в побудові вузлових точок функції [13, с. 484];

2) побудова поліноміальних регресій для табличних даних *P_{ij}* [13, с. 485];

 інтегрування поліноміальних регресій [13,
 с. 408] для отримання значень енергії, генерованої СБ протягом заданого часу для кожного її положення.

В результаті отримаємо дані, що відповідають матриці (5). Крім того, для кожного положення СБ маємо поліноміальні регресії та їх графічну інтерпретацію. Наявність цих даних дозволяє перейти до питань оптимізації.

Складемо математичні моделі сформульованих раніше частин оптимізації.

1. Всі сонячні батареї розташовуються однаково, в положенні L_{ij} , якому відповідає значення генерованої енергії E_{ij} . Задача оптимізації полягає в знаходженні положення СБ, що забезпечує генерацію максимальної енергії:

$$E_{ij} = E_{ij \max}.$$
 (7)

Для групи, що складається з N батарей, ця модель має вигляд

$$E_{\sum ij} = E_{ij \max} \cdot N.$$
(8)

При цьому можуть існувати різні обмеження простору пошуку (матриця (5)), пов'язані з технічною реалізацією сонячної електростанції, зокрема, як зазначалося вище, вартість застосованих технічних рішень не має входити в протиріччя з встановленим терміном окупності.

Це найпростіша задача для оптимізації, яка полягає в перегляді всіх значень E_{ij} та знаходженні максимального.

2. Сонячні батареї всередині групи розташовуються однаково, але положення в одній групі відрізняється від положення в інших групах кластера. Як і в попередньому випадку, потрібно знайти оптимальні положення СБ в групах з точки зору максимізації генерованої енергії, але для цілого кластера. Оскільки в загальному випадку існує величезна кількість можливих варіантів комбінацій груп, для спрощення аналізу будемо розглядати дві однакові за кількістю батарей групи, мінімальна кількість СБ — дві (в різних положеннях). В такому разі математична модель оптимізації виглядатиме так:

$$E_{\Sigma ij} = \max \sum_{k=1}^{2} E_{kij}.$$
(9)

Таке завдання може бути вирішене за допомогою дискретного програмування з використанням методів повного перебору, покоординатного пошуку та інших [15, 16]. Перший метод надає можливість знайти глобальний екстремум в просторі пошуку, який являє собою множину вузлових точок із відповідними наборами даних, що дозволяють в кожній з цих точок визначити елементи рішення.

На відміну від попереднього випадку, де початкові дані представлені у вигляді матриці (5), в цьому завданні потрібно сформувати матрицю, яка б надавала значення генерованої енергії кожною парою СБ, об'єднаних за всім різноманіттям їхніх положень. Отримаємо її з матриці (5) шляхом поелементного додавання.

Спочатку додаємо до кожного з елементів матриці (5) перший елемент цієї ж матриці:

$$E^{11} = \begin{bmatrix} (E_{11} + E_{11}), \dots, (E_{1j} + E_{11}), \dots, (E_{1n} + E_{11}) \\ (E_{21} + E_{11}), \dots, (E_{2j} + E_{11}), \dots, (E_{2n} + E_{11}) \\ \dots \\ E_{i1} + E_{11}), \dots, (E_{ij} + E_{11}), \dots, (E_{in} + E_{11}) \\ \dots \\ (E_{m1} + E_{11}), \dots, (E_{mj} + E_{11}), \dots, (E_{mn} + E_{11}) \end{bmatrix}.$$
(10)

На другому кроці додаємо до кожного з елементів матриці (5) другий елемент цієї ж матриці:

$$E^{12} = \begin{bmatrix} (E_{11} + E_{12}), \dots, (E_{1j} + E_{12}), \dots, (E_{1n} + E_{12}) \\ (E_{21} + E_{12}), \dots, (E_{2j} + E_{12}), \dots, (E_{2n} + E_{12}) \\ \dots \\ E_{i1} + E_{12}), \dots, (E_{ij} + E_{12}), \dots, (E_{in} + E_{12}) \\ \dots \\ (E_{m1} + E_{12}), \dots, (E_{mj} + E_{12}), \dots, (E_{mn} + E_{12}) \end{bmatrix}.$$
(11)

Процедура повторюється аж до останнього елемента E_{mn} .

Таким чином буде сформована кінцева матриця, аналогічна за завданням та формою матриці (5), яка в згорнутому стані має вигляд

$$E = \begin{bmatrix} E^{11}, E^{12}, ..., E^{1j}, ..., E^{1n} \\ E^{21}, E^{22}, ..., E^{2j}, ..., E^{2n} \\ \\ E^{i1}, E^{i2}, ..., E^{ij}, ..., E^{in} \\ \\ E^{m1}, E^{m2}, ..., E^{mj}, ..., E^{mn} \end{bmatrix}.$$
 (12)

Кількість вузлових точок простору пошуку, яка відбиває складність матриці в розгорнутому вигляді, можна розрахувати за формулою

$$F=M^2,$$
(13)

де М — кількість членів в матриці.

Задача оптимізації полягає у знаходженні максимального зі всіх значень значення суми $E_{ii} + E^{ij}$:

$$E_{ij} + E^{ij} = \max(E_{ij} + E^{ij}).$$
(14)

3. Завдання вирівнювання генерованої енергії у часі (назвемо це характеристикою генерування) розглянемо для тих самих умов, що і у п. 2, тобто об'єднання СБ у двох положеннях.

На першому кроці математична модель схожа з попередньою. Початковими даними є матриця даних (12). Цільова функція аналогічна попередній (див. формулу (14)), але відбір буде містити не один варі-

ант з максимальною енергією генерування, а декілька з найбільшими значеннями енергії для можливості подальшого відбору з метою вирівнювання характеристики генерування:

$$\left(E_{ij} + E^{ij} \right) \subset \begin{cases} \left(E_{ij} + E^{ij} \right)_{\max 1}, \left(E_{ij} + E^{ij} \right)_{\max 2}, ..., \\ \left(E_{ij} + E^{ij} \right)_{\max i}, ..., \left(E_{ij} + E^{ij} \right)_{\max l} \end{cases}, (15)$$

де *l* — кількість відібраних варіантів об'єднання СБ.

Ця множина обмежується відповідно до умови

$$(E_{ij} + E^{ij})_{\max i} \ge k(E_{ij} + E^{ij})_{\max 1},$$
(16)

де k — обмежувальний коефіцієнт, значення якого встановлюється на базі попереднього досвіду або якихось даних (наприклад, $0,9 \le k \le 1$).

На другому кроці за відібраними варіантами будуються графічні залежності генерованої потужності від часу P=f(t) (на одному графіку), потім візуально оцінюється нерівномірність їхніх характеристик генерування та відбирається той варіант, який має найбільш рівномірну характеристику. Це відповідає другому пріоритету з раніше встановлених — мінімальної нерівномірності характеристики.

Якщо все ж таки пріоритет віддається максимуму генерованої потужності, то потрібно переглянути результат, зосередившись на генерованій енергії.

Для формальної оцінки нерівномірності характеристики пропонується ввести показник нерівномірності на певному проміжку часу:

$$d = \frac{P(t_2) + P(t_3)}{P(t_1)N_1},$$
(17)

де $P(t_1)$ — максимальна генерована потужність впродовж заданого часу;

$$P(t_2), P(t_3)$$
 — генерована потужність на початку та наприкінці проміжку часу;

*N*₁ — кількість об'єднаних СБ.

При цьому вводиться обмеження d > b, де b встановлене на основі попередніх знань та даних значення. Вибір варіанта також може проводитись за максимальним значенням d_{max} .

Спираючись на створені математичні моделі, були розроблені алгоритми їх реалізації для оптимізації положень СБ. Для більшої відповідності попередньому представленню блок-схеми алгоритмів формувалися у вигляді окремих модулів, а саме:

підготовка вхідних даних — рис. 1; оптимізація розміщення СБ в одному положенні — рис. 2;

оптимізація розташування СБ в двох положеннях — рис. 3;

оптимізація розміщення СБ з вирівнюванням характеристики генерування енергії в часі — **рис. 4**.



Об'єкт досліджень та умови проведення експериментів

Для перевірки теоретичних результатів були проведені експериментальні дослідження СБ у повністю безхмарну погоду на березі моря в Одесі з 7.00 ранку до 12.30 дня 09 липня 2021 року. В різні проміжки часу, які коливались від 30 до 90 хв, були отримані залежності напруги холостого ходу $U_{\rm xx}$ та струму короткого замикання $I_{\rm K3}$ від кута місця а та азимута β сонячної батареї.

Для досліджень використовувалася сонячна панель компанії ABiSOLAR (табл. 1) та пристосування, яке дозволяє виставити СБ у горизонтальне положення, а також дискретно змінювати α та β (**рис. 5**).

Для вимірювання U_{xx} та I_{κ_3} використовувалися цифрові мультиметри.

Таблиця 1
Характеристики досліджуваної сонячної панелі
ABiSOLAR AB320-60MHC
https://abi-solar.com/uk/download/AB-60MHC_PL05.pdf)

Максимальна потужність (Р _{тах})	$320 \text{ Bt} (0 \pm 5 \text{ Bt})$
Струм короткого замикання (I _{к3})	10,34 A
Напруга холостого ходу ($U_{\rm xx}$)	40,6 B
Струм в точці максимальної потужності (I _{max})	9,51 A
Напруга в точці максимальної потужності (U _{maxP})	33,7 B
Максимальна напруга системи	1000 B
Кількість комірок та їхні розміри	120 (6×20) 156,75×78,375 мм
Розмір панелі	1665×992×35 мм
Вага	19 кг
Стандартні умови випробувань	1000 BT/m^2 ; 25°C; AM = 1.5



Послідовність проведення експериментальних досліджень відповідає вищенаведеним алгоритмам.

Для зручності залежності $I_{\rm K3}$ та $U_{\rm xx}$ від α та β , отримані в різний час, були приведені до одного параметра — потужності P (1) для дискретних значень факторів:

$$\begin{cases} \alpha \subset (15^{\circ}; 30^{\circ}; 45^{\circ}; 60^{\circ}; 75^{\circ}; 90^{\circ}); \\ \beta \subset (0^{\circ}; 15^{\circ}; 30^{\circ}; 45^{\circ}; 60^{\circ}; 75^{\circ}; 90^{\circ}); \end{cases}$$
(18)

 $t \in (7.20; 7.55; 8.40; 9.10; 9.40; 10.40; 12.20).$

Для *t* вказані усереднені значення часу проведення вимірювань у годинах та хвилинах.

Результати досліджень та їх обговорення

Оскільки отриманий у випробуваннях масив даних дуже об'ємний, в **табл. 2** для прикладу наводиться частина даних для $\beta = 0^{\circ}$, тобто при спрямованості панелі на південь. При цьому надаються розраховані за формулою (6) значення потужності.

За даними, наведеними в табл. 2, з використанням комп'ютерної системи Matlab були отримані поліноміальні регресії:

$y_1 = -2,5744x^3 + 74,099x^2 - 654,87x + 1886,9;$	
$y_2 = -2,7302x^3 + 79,165x^2 - 702,89x + 2006,7;$	
$y_3 = -2,8496x^3 + 82,803x^2 - 737,71x + 2097,5;$	(19)
$y_4 = -2,8726x^3 + 85,367x^2 - 785,55x + 2314,7;$	(1))
$y_5 = -2,1212x^3 + 66,753x^2 - 650,97x + 2034,3;$	
$y_6 = 0,62523x^3 - 12,433x^2 + 80,224x - 152,88.$	

На базі цих даних побудовано відповідні графіки залежностей, наведені на **рис. б**.

З метою отримання апроксимації, найбільш наближеної до експериментальних величин і водночас прийнятної складності, використовувались регресії третього ступеня (кубічні).

Особливу увагу слід приділити призначенню кількості значущих цифр в коефіцієнтах полінома (програма Matlab дозволяє вибрати від 2 до 5), оскільки від цього суттєво залежить точність моделей регресії та результати подальшого інтегрування. Виходячи з цього, була вибрана максимальна кількість значущих цифр, тобто 5.

В результаті інтегрування цих функцій (поліномів) в межах від 7,3 годин до 12,3 годин з інтервалом 0,5 години були отримані такі значення генерованої енергії у Вт. год:

$$E_{11} = 796;$$

$$E_{21} = 747;$$

$$E_{31} = 681;$$

$$E_{41} = 566;$$

$$E_{51} = 393;$$

$$E_{61} = 202.$$
(20)

(

Дані з випробувань сонячної панелі при $eta=0^\circ$									
Час <i>t</i> , год		7,3	7,9	8,7	9,2	9,7	10,7	12,3	Умовне позначення
	$\alpha = 15^{\circ}$	50,6	73,8	104,0	127,6	151,0	214,4	250,9	<i>Y</i> ₁
	$\alpha = 30^{\circ}$	35,5	38,9	95,6	117,5	136,8	207,1	257,3	<i>y</i> ₂
P BT	$\alpha = 45^{\circ}$	19,2	26,0	72,3	101,8	133,6	190,5	248,7	<i>Y</i> ₃
1,01	$\alpha = 60^{\circ}$	13,9	17,6	48,2	73,3	116,0	158,1	223,0	\mathcal{Y}_4
	$\alpha = 75^{\circ}$	13,6	14,8	21,6	42,7	70,4	110,4	179,4	y_5
	$\alpha = 90^{\circ}$	12,8	14,2	16,7	18,7	24,9	49,2	116,2	<i>y</i> ₆



300 250 Потужність, Вт 200 150 100 50 0 8 0 10 11 12 13 Час. год

Рис. 6. Графіки зміни потужності у часі при $\beta = 0^{\circ}$ та різних значеннях α:

 $1 - 15^{\circ}; 2 - 30^{\circ}; 3 - 45^{\circ};$ $4 - 60^{\circ}$; $5 - 75^{\circ}$; $6 - 90^{\circ}$

Позначення генерованої енергії відповідають першому стовпцю матриці (5) та дискретним значенням α і β , наведеним у (18).

Для проведення подальших досліджень необхідно побудувати поліноміальні залежності та виконати їх інтегрування для усіх значень факторів (18) і сформувати повну матрицю (у дужках вказані розраховані значення генерованої потужності):

$$E = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}}{(796)} \frac{E_{12}}{(811)} \frac{E_{13}}{(852)} \frac{E_{14}}{(920)} \frac{E_{15}}{(948)} \frac{E_{16}}{(970)} \frac{E_{17}}{(952)} \\ \frac{E_{21}}{(747)} \frac{E_{22}}{(815)} \frac{E_{23}}{(916)} \frac{E_{24}}{(991)} \frac{E_{25}}{(1051)} \frac{E_{26}}{(1093)} \frac{E_{27}}{(1084)} \\ \frac{E_{31}}{(681)} \frac{E_{32}}{(799)} \frac{E_{33}}{(930)} \frac{E_{34}}{(1028)} \frac{E_{35}}{(1102)} \frac{E_{36}}{(1162)} \frac{E_{37}}{(1164)} \\ \frac{E_{41}}{(566)} \frac{E_{42}}{(699)} \frac{E_{43}}{(861)} \frac{E_{44}}{(990)} \frac{E_{45}}{(1093)} \frac{E_{46}}{(1165)} \frac{E_{47}}{(1165)} \\ \frac{E_{51}}{(393)} \frac{E_{52}}{(538)} \frac{E_{53}}{(730)} \frac{E_{54}}{(874)} \frac{E_{55}}{(998)} \frac{E_{56}}{(1077)} \frac{E_{57}}{(1081)} \\ \frac{E_{61}}{(202)} \frac{E_{62}}{(318)} \frac{E_{63}}{(507)} \frac{E_{64}}{(669)} \frac{E_{65}}{(799)} \frac{E_{66}}{(891)} \frac{E_{67}}{(901)} \\ \end{bmatrix}$$

Проведення оптимізації

Таблиця 2

Оптимізація розміщення СБ в одному положенні. Відповідно до алгоритму визначаємо оптимальне положення СБ (чи групи СБ), яке відповідає максимальній генерованій енергії (див. рис. 2, блок 12). В умовах відносно невеликої кількості положень, як у нашому прикладі з матрицею (21), зробити це досить просто: переглядаючи значення Е₁₁, можна легко обрати максимальне значення — $E_{46} = E_{47} = 1165$ Вт. Воно відповідає двом положенням: кут місця $\alpha = 60^{\circ}$ і азимут $\beta = 75^{\circ}$ та $\beta = 90^{\circ}$.

При значній кількості положень та інших змінних (день та пора року) оптимальне значення потрібно шукати з використанням програмних засобів.

Оптимізацію розміщення СБ в різних положеннях розглянемо на прикладі об'єднання двох СБ. Актуальність такого об'єднання зростає при розрахунках генерованої енергії протягом всього світлового дня та в різні пори року.

Як і в попередньому прикладі, потрібно сформувати матрицю та знайти максимальне значення генерованої енергії (див. рис. 3, блоки 14, 15).

Матриця, елементи якої розраховуються відповідно до (9), буде мати структуру матриці (21), яка повторюється *n*·*m* раз, тобто 42 рази.

Для прикладу наведемо фрагмент такої матриці, яка утворюється шляхом поелементного додавання *E*₄₆ до матриці (21):

	1961	1976	2017	2085	2113	2135	2117	
	1912	1980	2081	2156	2216	2258	2249	
E ⁴⁶ _	1846	1964	2095	2193	2267	2327	2313	
E =	1731	1864	2026	2155	2258	2330	2330	.(22)
	1558	1703	1895	2039	2163	2242	2246	
	1367	1483	1672	1834	1964	2056	2066	

З цього фрагмента можемо виявити положення СБ, що відповідають максимальній генерованій енергії: $E_{46} = E_{47} = 2330$ Вт (для множини E_{46}). Як видно, вони такі ж самі, як і в попередньому випадку: кут місця $\alpha = 60^{\circ}$ і азимут $\beta = 75^{\circ}$ та $\beta = 90^{\circ}$.

Вирівнювання характеристики генерування енергії розглянемо відповідно до наведеного на рис. 4 алгоритма та на прикладі часткової матриці E⁴⁶ (22).

Виберемо множину максимальних значень енергії (див. рис. 4, блок 18), розташованих по мірі зменшення їхньої величини:

$$E_{46} = 2330, E_{47} = 2330, E_{36} = 2327, E_{37} = 2313,$$

$$E_{35} = 2267, E_{45} = 2258, E_{26} = 2258, E_{27} = 2249,$$

$$E_{57} = 2246, E_{56} = 2242, E_{25} = 2216, E_{34} = 2193.$$
(23)

Для відбору використано коефіцієнт $0,94 \le k \le 1$.

Графічні залежності P=f(t) для відібраних максимальних значень енергії (блок 20) побудуємо з використанням програми Matlab [13, с. 278] шляхом додавання раніше отриманих залежностей.

Наведемо приклад, що ілюструє завдання програми для побудови сумарного графіка двох функцій, заданих поліномами:

>>X=7.3: 0.1: 12.3;

>> Y=[(-2.5744 \cdot X³ + 74.099 \cdot X² - 654.87 \cdot X + 1886.9) + +(2.7302 \cdot X³ + 79.165 \cdot X² - 702.89 \cdot X + 2006.7)];

 $>> \operatorname{plot}(X, Y).$

На рис. 7 наведено графіки з найкращими показниками генерованої енергії, відповідно до множини (23). Очевидно, що з цього рисунка візуально вибрати варіант з мінімальною нерівномірністю характеристики (блок 23) практично неможливо через велику кількість кривих. Це можна зробити на екрані комп'ютера або за найкращим співвідношенням $(E_{ij} + E^{ij})_{max}$ та d (блок 22). Надалі відповідно до алгоритму (рис. 4) визна-

⁹ Надалії відповідно до алгоритму (рис. 4) визначається d (блок 24), задається значення b, наприклад b=0,65, відбираються варіанти відповідно до блоку 26, розраховуються значення $(E_{ij}+E^{ij})_{\max}$ та d (блок 28). Отримані дані зведені в **табл. 3**. За найкращим співвідношенням $(E_{ij}+E^{ij})_{\max}$ · d оптимальним є варіант E_{36} (блок 29).



Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3-4

Таблиця 3

Результати реалізації блоку 28 на рис. 4

Позна- чення	$P(t_1)$	$P(t_2)$	$P(t_3)$	d	$(E_{ij} + E^{ij})_{\max i} \cdot d$
E ₄₆	519,6	307,8	443,8	0,723	1685
E ₄₇	514,7	286,0	429,3	0,694	1618
E ₃₆	523,4	294,8	467,8	0,728	1695
E ₃₇	521,0	247,9	457,5	0,676	1565
E ₃₅	519,6	251,4	475,3	0,699	1585
E45	510,1	281,4	453,1	0,719	1625
E ₂₆	513,7	270,6	475,3	0,726	1640
E ₂₇	512,5	239,5	467,8	0,690	1552
E ₅₇	498,4	288,3	384,3	0,674	1515
E ₅₆	492,6	312,4	404,6	0,727	1631
E ₂₅	512,7	241,3	481,3	0,705	1561
E ₃₄	508,8	236,5	479,9	0,704	1544



Рис. 8. Графіки зміни генерованої потужності у часі з найбільшим (1) та найменшим (2) показником нерівномірності характеристики



Графічна інтерпретація характеристики з найбільшим та найменшим значенням нерівномірності наведена на **рис. 8**.

Можливість візуально оцінити сумарні характеристики з точки зору їх нерівномірності дає **рис. 9**. (Тут різниця генерованої потужності в часі для положень, що відповідають графікам 3 і 4, є незначною, але слід мати на увазі, що ці залежності не є результатом оптимізації, а наведені як приклад використання методу.)

Висновки

Таким чином, в результаті досліджень було розроблено метод оптимізації положення сонячних батарей для ефективного їх використання, а саме для отримання максимальної електричної енергії генерування для випадків повністю фіксованого розташування СБ і у разі сезонної зміни положення. Метод містить математичні моделі, алгоритми та адаптовану значною мірою для практичного використання комп'ютерну систему Matlab як для безпосереднього використання, так і для програмування виконання більш об'ємних обчислювальних операцій. Наведені приклади та результати їх вирішення дають наочне уявлення про застосування методу та його подальший розвиток.

Надалі планується провести експериментальні дослідження сонячних батарей протягом всього світлового дня в різні пори року та сформувати відповідну базу даних, адаптовану до подальшого використання в комп'ютерних програмах. Крім цього, необхідно розробити наскрізну програму для обробки експериментальних даних і моделювання роботи сонячних батарей та їх кластерів в різних умовах.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Al-Shahri Omar A., Ismail Firas B., Hannan M.A. et al. Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 284, 125465. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125465

2. Myeongchan Oh, Hyeong-Dong Park. Optimization of solar panel orientation considering temporal volatility and scenario-based photovoltaic potential: A case study in Seoul national university. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 17, 3262. https://doi.org/10.3390/en12173262

3. Naraghi M. H., Atefi E. Optimum solar panel orientation and performance: A climatic data-driven metaheuristic approach. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 2, 624. https://doi.org/10.3390/en15020624

4. Masili M., Ventura L. Local tilt optimization of photovoltaic solar panels for maximum radiation absorption. *International Journal of Photoenergy*, 2019, Article ID 3254780. https://doi. org/10.1155/2019/3254780

5. Yadav A. K., Chandel S.S. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 23, pp. 503–513. https://doi.org/10.1016/j. rser.2013.02.027

6. Gi Yong Kim, Doo Sol Han, Zoonky Lee. Solar panel tilt angle optimization using machine learning model: A case study of Daegu city, South Korea. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 3. https://doi. org/10.3390/en13030529

7. Слипченко Н.И., Письменецкий В.А., Фролов А.В. и др. Экспериментальные исследования характеристик солнечной панели KV 150/24(12) в зимних условиях. Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Новые решения в современных технологиях, Харьков, 2011, № 24, с. 86–92. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/12877

8. Oltu O., Milea P.L., Dragulinescu M., Franti E. Solar panel energetic efficiency optimization method, based on an specific detector and orientation microsystem. 2007 IEEE International Semiconductor Conference, Sinaia, Romania. https://doi.org/10.1109/ SMICND.2007.4519663

9. Bifacial solar panels give increased power output potential. *DS New Energy*, Jun 18, 2019. URL: https://www.dsneg.com/info/bifacial-solar-panels-give-increased-power-out-36005894.html

10. vertical.solar. URL: https://vertical.solar

11. Kazem H. A., Khatib T., Alwaeli A. A. K. Optimization of photovoltaic modules tilt angle for Oman. 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), Langkawi, Malaysia, 2013, pp. 703–707, https://doi.org/10.1109/ PEOCO.2013.6564637

12. Єфіменко А.А., Логвінов О.В., Присяжнюк Л.І. Використання повного факторного експерименту для моделювання генерації електроенергії сонячними батареями. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2022, №4–6, с. 32–38. https://doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.32

13. Дьяконов В.П. *МАТLAB. Полный самоучитель*. М., ДМК Пресс, 2012, 768 с.

14. Paluszek M., Thomas S. *Practical MATLAB Deep Learning*. APress, 2020, 252 p.

15. Фролов В.А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС. Київ, Вища школа, 1991, 310 с.

16. Кохендерфер М., Уилер Т. Алгоритмы оптимизации. М., Вильямс, 2020, 528 с.

Дата надходження рукопису до редакції 13.10 2023 р.

Опис статті для цитування:

Єфіменко А. А., Присяжнюк Л. І. Моделі та алгоритми оптимізації розташування сонячних батарей. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4, с. 24–34. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.24

Cite the article as:

Yefimenko A. A., Prisyazhniuk L. I. Models and algorithms for optimizing the location of solar batteries. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 24–34. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2023.3-4.24

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.24 UDC 621.311.243

A. A. YEFIMENKO, L. I. PRISYAZHNIUK

Ukraine, Odessa, Odessa Polytechnic National University E-mail: bogachevalyuba523@gmail.com

MODELS AND ALGORITHMS FOR OPTIMIZING THE LOCATION OF SOLAR BATTERIES

The study aimed to create a method for optimizing the position of solar batteries with fixed location to increase their efficiency, namely, the generation of maximum energy during a certain time, as well as reducing the unevenness of electricity generation over time.

The study allowed developing a method of optimizing the position of solar batteries to increase their efficiency, namely obtaining the maximum electrical energy generation both with a completely fixed location of solar batteries and with a seasonal change in position.

The developed models and algorithms, the given examples and the results of their solution with the construction of polynomial regressions and their graphical representation, integration of polynomials to obtain the values of the generated energy give a clear idea of the application of the method of optimizing the position of solar panels to maximize the generated energy and equalize the generation characteristics over time, as well as ways to develop them further.

The theoretical research made it possible to solve an important scientific and technical problem of increasing the performance of solar batteries by placing them in an optimal position relative to the Sun. The model of placement of the solar battery and the method that allows optimizing its position were further developed. The field of using the Matlab computer program for simulating the operation of solar batteries was further expanded. For the first time, the work offers a model and method of using solar cells with different positions relative to the Sun designed to increase the amount of electric energy generated and equalize the energy generation characteristic, which is expressed as a dependence of power over time. For this purpose, the authors introduce the coefficient of unevenness of the generation characteristic, which establishes the relationship between the maximum power and the capacities at other moments of time and allows objectively evaluating the unevenness of the characteristic.

The practical value of the proposed solutions consists in the ability to simulate the operation of the solar battery in various conditions based on experimental studies and using the Matlab computer system.

Key words: solar energy, solar cells, generated energy, tilt angle, azimuth, orientation optimization.

REFERENCES

1. Al-Shahri Omar A., Ismail Firas B., Hannan M.A. et al. Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 284, 125465. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125465

2. Myeongchan Oh, Hyeong-Dong Park. Optimization of solar panel orientation considering temporal volatility and scenario-based photovoltaic potential: A case study in Seoul national university. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 17, 3262. https://doi.org/10.3390/en12173262

3. Naraghi M. H., Atefi E. Optimum solar panel orientation and performance: A climatic data-driven metaheuristic approach. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 2, 624. https://doi.org/10.3390/en15020624

4. Masili M., Ventura L. Local tilt optimization of photovoltaic solar panels for maximum radiation absorption. *International Journal of Photoenergy*, 2019, Article ID 3254780. https://doi. org/10.1155/2019/3254780

5. Yadav A. K., Chandel S.S. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 23, pp. 503–513. https://doi.org/10.1016/j. rser.2013.02.027

6. Gi Yong Kim, Doo Sol Han, Zoonky Lee. Solar panel tilt angle optimization using machine learning model: A case study of Daegu city, South Korea. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 3. https://doi.org/10.3390/en13030529

7. Slipchenko N.I., Pysmenetskyi V.A., Frolov A.V. et al. [Experimental studies of the characteristics of the solar panel KV 150/24(12) in winter conditions]. *Bulletin of the NTU "KhPI"*, Kharkiv, 2011, no. 24, pp. 86–92. URL: https://repository.kpi.kharkov. ua/handle/KhPI-Press/12877 (Rus) 8. Oltu O., Milea P.L., Dragulinescu M., Franti E. Solar panel energetic efficiency optimization method, based on an specific detector and orientation microsystem. 2007 IEEE International Semiconductor Conference, Sinaia, Romania. https://doi.org/10.1109/SMICND.2007.4519663

9. Bifacial solar panels give increased power output potential. DS New Energy, Jun 18, 2019. URL: https://www.dsneg.com/info/ bifacial-solar-panels-give-increased-power-out-36005894.html

10. vertical.solar. URL: https://vertical.solar

11. Kazem H. A., Khatib T., Alwaeli A. A. K. Optimization of photovoltaic modules tilt angle for Oman. 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), Langkawi, Malaysia, 2013, pp. 703–707, https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564637

12. Yefimenko A.A., Logvinov O.V., Prysiazhniuk L.I. [Using full factorial experiment to simulate electricity generation by solar batteries]. *Technology and design in electronic equipment*, 2022, №4-6, pp. 32-38. https://doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.32 (Ukr)

13. Dyakonov V.P. *MATLAB. Polnyy samouchitel*' [MATLAB. Complete self-tutor]. M., DMK Press, 2012, 768 p. (Rus)

14. Paluszek M., Thomas S. *Practical MATLAB Deep Learning*. APress, 2020, 252 p.

15. Frolov V.A. *Analiz i optimizatsiya v prikladnykh zadachakh konstruirovaniya RES* [Analysis and optimization in applied tasks of electronic equipment design]. Kyiv, Vyshcha shkola, 1991, 310 p. (Rus)

16. Kohenderfer M., Wheeler T. *Algoritmy optimizatsii* [Optimisation algorithms]. M., Williams, 2020, 528 p. (Rus)
УДК 621.382

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.35

Д. ф.-м. н. І. М. ВІКУЛІН¹, д. т. н. Л. Ф. ВІКУЛІНА², к. т. н. П. Ю. МАРКОЛЕНКО¹, к. ф.-м. н. О. А. НАЗАРЕНКО¹

Україна, м. Одеса, ¹Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку; ²Одеський Державний аграрний університет E-mail: markolenko@ukr.net

ЗБІЛЬШЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ТА РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ СЕНСОРІВ-ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ ГЕНЕРАТОРІВ НА ОДНОПЕРЕХІДНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Експериментально досліджено вплив температури та радіації на характеристики генераторів на основі одноперехідного транзистора (ОПТ). Для підсилення залежності частоти від температури в коло емітера ОПТ та бази вводяться польові транзистори. Максимальна чутливість з прямою залежністю частоти від температури та максимальна компенсація дії радіації на вихідний сигнал досягається при включенні в коло емітера ОПТ польового МДНтранзистора, а в коло бази — польового транзистора з р-п-переходом. Встановлено також граничні величини потоків різних випромінювань, вище яких генератор перестає працювати.

Ключові слова: сенсор-перетворювач, одноперехідний транзистор, польовий транзистор, температурна залежність, радіаційна стійкість.

Датчик є обов'язковим елементом приладів вимірювання, систем контролю, регулювання та інших. За типом вихідного сигналу датчики температури поділяються на два типи: у перших вихідним параметром є струм або напруга, що залежать від температури, у других вихідним параметром є частота змінного сигналу.

Перетворення сигналу з датчика в низку послідовних імпульсів, частота яких залежить від рівня вимірюваного впливу, є оптимальним для обробки інформації на ЕОМ. Частотно-модульований сигнал зручний для прямого підключення мікропроцесорних систем, оскільки не потребує аналого-цифрового перетворення. Це дозволяє створювати радіовимірювальні перетворювачі за стандартною інтегральною технологією і дає можливість підвищити швидкість дії, точність і чутливість, розширити діапазон величин, що вимірюються, підвищити надійність, перешкодостійкість і довготривалу стабільність параметрів [1].

Найбільш перспективними датчиками з частотним виходом є датчики з використанням релаксаційного генератора на одноперехідному транзисторі (**OIIT**) [2–4]. Схема генератора та структура ОПТ наведені на **рис.** 1.

Принцип дії генератора досить простий. Після ввімкнення джерела живлення з електрорушійною силою E її частина падає на опорі нижньої частини бази $r_{\rm b}$. Потенціал бази навпроти емітера дорів-



нює $U_{\rm b}$, напруга на конденсаторі емітера — нулю, а p-*n*-перехід включений у зворотному напрямку. Конденсатор починає заряджатися через опір $R_{\rm E}$. Як тільки напруга $U_{\rm E}$ перевищить $U_{\rm b}$, p-*n*-перехід буде ввімкнений у прямому напрямку та почне інжектувати в базу дірки, які заливають нижню частину бази, а $r_{\rm b}$ зменшуватиметься. Це знизить $U_{\rm b}$ і ще сильніше збільшить напругу на p-*n*-переході. Такий лавиноподібний процес призводить до розрядки конденсатора, після чого процес повторюється. Вихідний імпульсний сигнал знімається з резистора $R_{\rm b}$. Період коливань практично дорівнює часу зарядки конденсатора, тому частота

$$f \approx \frac{I_{\rm E}}{C(U_{\rm B} - U_{\rm 3})},\tag{1}$$

де C — ємність конденсатора;

*I*_E, *U*_B— струм емітера та напруга вмикання емітера;

U₃ — залишкова напруга на базі в увімкненому стані при максимальному зменшенні її опору до r_{БІ} (мінімальний опір при інжекції).

Відповідно, $U_{\rm B} = I_{\rm b} r_{\rm b0}$, $U_3 = I_{\rm b} r_{\rm b1}$, де $r_{\rm b0}$ — вихідний опір бази до інжекції носіїв заряду з емітера. Тоді рівняння (1) можна записати у вигляді

$$f \approx \frac{I_{\rm E}}{CI_{\rm b}(r_{\rm b0} - r_{\rm bI})}.$$
(2)

Термочутливість такого датчика визначається залежністю від температури різниці $r_{\rm E0} - r_{\rm EI}$, яка є досить малою, тому чутливість є слабкою.

Метою цієї роботи є збільшення термочутливості та радіаційної стійкості датчиків на основі генератора на ОПТ із частотним виходом заміною пасивних резисторів на термочутливі польові транзистори.

СЕНСОЕЛЕКТРОНІКА

Термочутливі генератори з польовими транзисторами

Для збільшення термочутливості можна замість резистора R_E ввести у базу польовий транзистор (**ПТ**) у двополюсному включенні (затвор замкнутий з витоком). Такі ПТ з *p*–*n*-переходом в ролі затвора (ПТ1) та МДН-типу (ПТ2) виконують функції генераторів струму (струм не залежить від напруги) та мають протилежну залежність струму від температури.

Струм насичення через ПТ у двополюсному ввімкненні [5] визначається як

$$I_{S} = \chi \mu n^{2}, \qquad (3)$$

- де μ, *n* рухливість та концентрація основних носіїв струму в каналі відповідно;

У напівпровіднику *n*-типу концентрація електронів дорівнює $n = n_i + n_n$, де n_i , n_n — концентрації власних та домішкових носіїв заряду відповідно. Концентрація носіїв заряду домішки у ПТ1 набагато більша за власну концентрацію, тому $n \approx n_n$ й практично не залежить від температури. Рухливість µ зі зростанням температури зменшується внаслідок збільшення кількості зіткнень носіїв заряду з атомами, що визначає зменшення струму I_S зі зростанням температури [6, с. 117].

Експериментально досліджувалися генератори на основі промислових ОПТ типу КТ117Г з ПТ1 типу 2П202 в колі емітера (**рис. 2**, *a*) та конденсатором ємністю 6,8 пФ.

Температурні залежності частоти для датчиків, схеми яких представлені на рис. 2, наведено на **рис. 3**. Для датчика з оберненою залежністю f(T) при збільшенні температури T від 0 до 100°С частота лінійно зменшується від 14 до 3 кГц (рис. 3, крива I), що відповідає формулі (2), де I_E — струм через ПТ1. Чутливість такого датчика становить 100–120 Гц/°С.

На практиці частіше використовуються датчики з прямою залежністю частоти від температури. У таких датчиках коло емітера ОПТ містить ПТ МДН-типу (рис. 2, б). Такі транзистори виготовляються з використанням напівпровідників з низькою концентрацією домішки. Тому зростання концентрації власних носіїв зі збільшенням температури забезпечує зростання струму I_s та, як наслідок, призводить до збільшення частоти f. Рухливість носіїв при цьому зменшується так само, як і в ПТ1, але меншою мірою, ніж концентрація. В експериментальних датчиках цього типу (рис. 2, б) використовувалися МДН-транзистори КП305А. Термочутливість датчика при такому ж самому конденсаторі становила 100-200 Гц/°С, але залежність f(T) вже не є лінійною (рис. 3, крива 2). Для досягнення лінійності в коло між затвором і витоком вводиться резистор, що поліпшує лінійність, але чутливість при цьому знижується (крива 3). Для



I — рис. 2, *a*; *2* — рис. 2, *б* без резистора (*R*=0 Ом); *3* — рис. 2, *б* з резистором *R*=400 Ом; *4* — рис. 2, *в*

збільшення чутливості в коло бази ОПТ вводиться ПТ з p-n-переходом в ролі затвора (рис. 2, e), струм через який зі зростанням температури зменшується ($I_{\rm b}$ у формулі (2)), що призводить до додаткового зростання частоти та поліпшення лінійності залежності f(T) (рис. 3, крива 4).

Вплив радіації на термочутливі генератори

Оскільки датчики температури використовуються не тільки в звичайних умовах, а й в умовах радіаційного опромінення, розглянемо вплив радіації на їхні параметри [7, 8].

Для вивчення такого впливу транзистори датчиків опромінювалися потоком електронів з енергією 5 MeB, γ-квантами з енергією 1 MeB та потоком нейтронів з енергією 1,1 MeB.

Дія випромінювання на ОПТ складається з впливу на *p*-*n*-перехід емітера та опір бази $r_{\rm b}$, тому найбільш чутливим до радіації параметром є остаточна напруга на *p*-*n*-переході емітера у ввімкненому стані $U_{\rm O} \approx I_{\rm E} r_{\rm bI}$.





Під дією радіації опір $r_{\rm bl}$ зростає через зменшення концентрації як основних носіїв (**рис. 4**), так і носіїв заряду, інжектованих p-n-переходом. Останнє пов'язане з тим, що, по-перше, під дією радіації в p-n-переході емітера виникають шунтувальні дефекти, які зменшують коефіцієнт інжекції, і, по-друге, зменшується час життя інжектованих носіїв в базі, що призводить до зменшення глибини їх проникнення в базу. Всі ці ефекти призводять до зростання U_{Ω} .

Збільшення $U_{\rm O}$ під дією радіації призводить до зменшення ділянки з від'ємним диференціальним опором на ВАХ ($U_{\rm B} - U_{\rm O}$) та зростанню частоти генерації. Так, наприклад, частота звичайного генератора на ОПТ (з резистором в колі емітера) після опромінення потоком електронів $\Phi_{\rm e} \approx 10^{15}$ см⁻² з енергією 4 МеВ збільшувалася з 350 Гц до 1,8 кГц при температурі 295 К, а термочутливість зростала від 4,8 до 29,5 Гц/°С. При подальшому зростанні потоку величина $U_{\rm B} - U_{\rm O}$ зменшується настільки, що генерація взагалі не виникає.

На рис. 4 показано, як впливає потік електронів на співвідношення струму насичення польового транзистора з p-n-переходом $I_{S\Phi}$ та струму до опромінення I_{S0} . Як відомо [9], опромінення призводить до утворення дефектів у кристалічній структурі напівпровідника, що спричинює зменшення рухливості та концентрації носіїв заряду в каналі, а отже, і зменшення струму насичення ПТ1. Це призводить до зменшення частоти датчика на рис. 2, a, де ПТ1 включений в коло емітера ОПТ. Таким чином, ПТ1 частково компенсує вплив радіації на вихідну частоту датчика на ОПТ, тобто послаблює дію радіації.

Опромінення МДН-транзисторів призводить до утворення в діелектрику електронно-діркових пар. Більш швидкі електрони прямують або до металу затвора, або до напівпровідника (залежно від полярності напруги на затворі), а дірки частково захоплюються ловушками діелектрика та утворюють позитивний заряд. Цей заряд збільшує концентрацію електронів у *n*-каналі, а опромінення безпосередньо самого каналу зменшує її. Таким чином, залежно від співвідношення цих двох ефектів і якщо $\Phi_e < 10^{14}$ см⁻², струм I_S при опроміненні може як зменшуватися, так і збільшуватися у невеликих межах. Однак у разі великих потоків спостерігається однозначне зменшення I_S подібно до залежності на рис. 4. Аналогічне зменшення відбувається і при опроміненні γ-квантами та нейтронами. При цьому потоку електронів 10^{14} см⁻² відповідає потік нейтронів 10^{13} см⁻² або γ-випромінювання дозою 10^5 Р.

У схемі з двома ПТ (рис. 2, *в*) при опроміненні одночасно зі зменшенням знаменника у формулі (2) зменшується також чисельник (тобто струм), а відхилення частоти після радіаційного впливу стає менше. При цьому гранична величина потоку опромінення, вище якої генератор перестає працювати (визначається ОПТ), не змінюється. Необхідно зазначити, що досліджувалися транзистори у стандартних металевих корпусах, і якщо використовувати безкорпусні транзистори, граничні потоки зменшаться.

Висновок

Експериментальні дослідження датчиків температури з частотним виходом на основі генератора на одноперехідному транзисторі з двома струмозадавальними резисторами та конденсатором показали, що заміна резисторів двома польовими транзисторами у двополюсному включенні (затвор замкнутий із витоком) з протилежними знаками зміни струму від температури дозволяє багатократно збільшити термочутливість датчика. Це також дозволяє створювати датчики із протилежними знаками зміни частоти від температури. Також показано, що опромінення однаковим потоком по-різному впливає на характеристики складових транзисторів датчика. В комплексі це дозволяє компенсувати вплив радіації на вихідну частоту датчика.

Таким чином, використання польових транзисторів у схемі термочутливого генератора на одноперехідному транзисторі дозволяє не лише поліпшити метрологічні характеристики датчика температури, а й підвищити радіаційну стійкість.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Виглеб Г. Датчики. М., Мир, 1989, 196 с.

2. Шарапов В.М., Полищук Е.С., Ишанин Г.Г. Датчики : справочное пособие. Черкаси, Брама-Україна. 2008, 1072 с.

3. Вербицький В.Г., Воробієнко П.П., Курмашев Ш.Д. та ін. *Розробка високоефективних технологій оптоелектроніки*. Київ, Логос, 2009, 301 с.

4. Chen Yx., Liu J., Xiao K. et al. Unijunction transistor on silicon-on-insulator substrate. 2020 IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT), Kunming, China, 2020, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/ICSICT49897.2020.9278352

 Vikulin I.M., Vikulina L.F., Gorbachev V. E., Mikhailov N.
 Temperature stable radiation-resistant current reference generator based on field-effect transistors. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2021, vol. 64, no. 6, pp. 310–318. https://doi.org/10.3103/ S0735272721060042 СЕНСОЕЛЕКТРОНІКА

6. Мокріцький В.А., Маслов О.В. *Фізико-техничні основи мі*кроелектроніки. Т. І. Одеса: Екологія, 2018, 204 с.

7. Кулаков В.М., Ладыгин Е. А., Шаховцев В. И. и др. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М., Сов. Радио, 1980, 234 с.

8. Горбачова Г.В., Марколенко П.Ю. Дія іонізуючого випромінювання на частотні перетворювачі температури. Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.35 UDC 621.382 *"Інфокомунікації – Сучасність та майбутнє"*. Україна, Одеса, 2019, с. 83–86.

9. Вікулін І.М., Горбачов В.Е., Назаренко О.А. Радіаційночутливий детектор на основі польових транзисторів. *Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка*, 2017, т. 60, № 9, с. 515–520. https://doi.org/10.3103/S0735272717090035

> Дата надходження рукопису до редакції 30.10 2023 р.

I. M. VIKULIN¹, L. F. VIKULINA², P. Yu. MARKOLENKO¹, O. A. NAZARENKO¹

Ukraine, Odesa, ¹State University of Intellectual Technologies and Communications, ²Odesa State Agrarian University E-mail: markolenko@ukr.net

INCREASING THE SENSITIVITY AND RADIATION RESISTANCE OF TEMPERATURE SENSOR-CONVERTERS USING GENERATORS BASED ON UNIJUNCTION TRANSISTORS

The authors experimentally study the influence of temperature and radiation on the characteristics of generators based on a unijunction transistor (UJT). It is shown that when using a UJT-based generator as a sensor-converter with a frequency output, field-effect transistors are placed into the UJT emitter and base circuits to increase the dependence of frequency on temperature. Maximum sensitivity with direct dependence of frequency on temperature is achieved when a field-effect MOS transistor is connected to the emitter circuit UJT, and a field-effect transistor with a p-n junction is connected to the base circuit. The influence of radiation on the thermal sensitivity of generators is studied. The component transistors are irradiated with a flow of electrons, γ -quanta and neutrons. It is established that the irradiation of each transistor has a different effect on the initial frequency of the generator; it either decreases or increases. It is shown that it is possible to reduce the dependence of the output frequency on radiation using a transistor generator circuit with the opposite sign of the change in the generator frequency due to radiation. Maximum compensation for the effect of radiation on the output signal can be obtained by using a MOS transistor in the UJT emitter circuit, and a transistor with a p-n junction in the base circuit. The study establishes the limit values for fluxes of various radiations, after which the generator stops working.

Keywords: sensor converter, unijunction transistor, field-effect transistor, temperature dependence, radiation resistance.

REFERENCES

1. Vigleb G. Datchiki [Sensors]. M., Mir, 1989, 196 p. (Rus)

2. Sharapov V.M., Polishchuk E.S., Ishanin G.G. *Datchiki : spravochnoye posobiye*. [Sensors : reference guide]. Cherkasy, Brama-Ukraine. 2008, 1072 p. (Rus)

3. Verbyts'kyy V.H., Vorobiyenko P.P., Kurmashev Sh.D. et al. *Rozrobka vysokoefektyvnykh tekhnolohiy optoelektroniky* [Development of highly efficient technologies of optoelectronics]. Kyiv, Logos, 2009, 301 p. (Ukr)

4. Chen Yx., Liu J., Xiao K. et al. Unijunction transistor on silicon-on-insulator substrate. 2020 IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT), Kunming, China, 2020, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/ ICSICT49897.2020.9278352

 Vikulin I.M., Vikulina L.F., Gorbachev V. E., Mikhailov N.
 Temperature stable radiation-resistant current reference generator based on field-effect transistors. *Radioelectronics and Communications* Systems. 2021, vol. 64, no. 6, pp. 310-318. https://doi.org/10.3103/ S0735272721060042

6. Mokrits'kyy V.A., Maslov O.V. *Fizyko-tekhnychni osnovy mikroelektroniky. T. 1.* [Physical and technical foundations of microelectronics, vol. 1]. Odesa, Ecology, 2018, 204 p. (Ukr)

7. Kulakov V.M., Ladygin Ye. A., Shakhovtsev V. I. et al. *Deystviye* pronikayushchey radiatsii na izdeliya elektronnoy tekhniki [The effect of penetrating radiation on electronic products]. M: Sov. Radio, 1980, 234 p. (Rus)

8. Horbachova H.V., Markolenko P.Yu. [The effect of ionizing radiation on frequency temperature converters]. *IX International Scientific and Practical Conference "Infocommunications – Present and Future"*. Ukraine, Odesa, 2019, pp. 83–86. (Ukr)

9. Vikulin I.M., Gorbachev V.E., Nazarenko A.A. Radiationsensitive detector based on field-effect transistors. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 515–520 401–404. https://doi.org/10.3103/S0735272717090035 (Ukr)

Опис статті для цитування:

Вікулін І. М., Вікуліна Л. Ф., Марколенко П. Ю., Назаренко О. А. Збільшення чутливості та радіаційної стійкості сенсорівперетворювачів температури на основі генераторів на одноперехідних транзисторах. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3-4, с. 35-38. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2023.3-4.35

Cite the article as:

Vikulin I. M., Vikulina L. F., Markolenko P. Yu., Nazarenko O. A. Increasing the sensitivity and radiation resistance of temperature sensor-converters using generators based on unijunction transistors. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 35–38. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.35

БІОМЕДИЧНА ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.317.07

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.39

В. С. ГАЄВСЬКИЙ, к. т. н. Е. М. ГЛУШЕЧЕНКО, В. В. ЛАБУНСЬКИЙ, О. Д. ТУЗ

Україна, м. Київ, НВП «Сатурн» E-mail: gen-nto@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ НВЧ-РАДІОМЕТРІЇ У ПОБУДОВІ МЕДИЧНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ НЕІНВАЗИВНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Наведено принципи застосування НВЧ-радіометрії для неінвазивної діагностики стану внутрішніх органів людини за їхнім власним випромінюванням. Показано, що оптимальною для використання у медичній радіотермометрії є модуляційно-компенсаційна схема радіометра, заснована на вимірюванні двох параметрів: інтегральної температури та інтегрального коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль від біооб'єкта. Підходи до розроблення сучасних радіотермографів були застосовані науковцями НВП «Сатурн» в процесі створення пристрою для діагностики аномалій температури молочної залози та антен-аплікаторів.

Ключові слова: НВЧ-радіометрія, медична радіотермометрія, інтегральна температура, антена-аплікатор, біологічна тканина, коефіцієнт відбиття, електромагнітне випромінювання.

Радіометрія — це особливий напрямок радіоелектроніки, який відповідає за створення високочутливих пристроїв (радіометрів) для виявлення та вимірювання слабих електромагнітних випромінювань, інтенсивність яких може бути меншою за інтенсивність власних шумів радіометрів. Достатньо повно основні принципи радіометрії та її особливості розглянуто у роботі [1]. Радіометри радіохвильового та надвисокочастотного (**HBH**) діапазонів широко застосовуються не тільки в багатьох галузях науки і техніки, в першу чергу в радіоастрономії, у фізиці, метеорології та інших, а і в медицині теж.

Сучасна медицина використовує широке коло діагностичних методів та приладів, які можна поділити на два великі класи: інвазивні та неінвазивні. Методи та прилади першого класу використовують інформацію, отриману від органів безпосередньо, другого класу — отриману за випромінюваним цими органами полем.

Серед інформації, яку потрібно отримати для діагностування, часто використовується температура, оскільки патологічні процеси, що відбуваються в організмі людини, як правило, супроводжуються тепловими відхиленнями не тільки на поверхні, але й всередині тіла. Використовувані для вимірювання температури поверхні тіла медичні термометри, інфрачервоні пірометри, тепловізори не придатні для вимірювання глибинної температури біологічного об'єкта. Для цього існує багато пристроїв і методів. Найточніші результати можна отримати за допомогою датчиків, таких як термістори, термопари або волоконно-оптичні датчики, розмістивши їх безпосередньо у досліджуваній тканині або порожнині тіла (стравохід, вухо, рот тощо). Але у багатьох випадках таке інвазивне втручання є або клінічно неприйнятним, або неможливим. Зазвичай це стосується вимірювання температури органів тіла та довгострокового моніторингу підповерхневих тканин. У таких випадках застосовуються неінвазивні методи, зокрема мікрохвильова радіометрія. Можливість її використання для визначення глибинної температури біологічного об'єкта за його власним електромагнітним випроміненням забезпечується тим, що радіохвилі значно слабше поглинаються біологічними тканинами, ніж хвилі інфрачервоного (**IU**) діапазону.

Перші спроби застосування радіохвильових радіометрів HBЧ-діапазону в медичних дослідженнях відомі вже понад 40 років [2-4]. Через недостатню чутливість тодішньої радіометричної апаратури цей напрямок в медицині широкого застосування набув не одразу, проте розвиток теоретичної бази та нові схемотехнічні рішення призвели до виникнення численних розробок мікрохвильових радіометрів та методів діагностики, наприклад, патології головного мозку, раку молочних залоз, ішемічної хвороби серця, артриту, порушень кровотоку тощо [5-15].

Медична радіотермографія дозволяє неінвазивно визначати інтегральні глибинні температури внутрішніх органів, причому ефективна глибина, за якою здійснюється інтегрування, може регулюватися. В результаті оброблення цієї інформації можна одержати профіль глибинної температури. Мала інерційність цього методу дозволяє досліджувати динаміку глибинної температури, як інтегральної, так і локальної, тобто застосовувати радіотермографію не тільки для стаціонарної діагностики, але й для оцінки медикаментозного чи фізіотерапевтичного впливу на температурний режим внутрішніх органів людини.

Розробка сучасної радіометричної апаратури пов'язана з розв'язанням таких складних проблем,

БІОМЕДИЧНА ЕЛЕКТРОНІКА

як забезпечення високої чутливості пристроїв, узгодження антени з біооб'єктом, забезпечення необхідної глибини проникнення, а також вимірювання абсолютної температури з похибкою не гірше 0,1°С.

Сучасна медицина потребує вдосконалення неінвазивних методів вимірювання температури у глибині тіла людини з метою ранньої діагностики та моніторингу різноманітних патологічних процесів. З огляду на важливість зазначеної проблеми, в цій роботі продемонстровано підходи до розроблення сучасних радіотермографів, що були застосовані науковцями НВП «Сатурн» в процесі створення пристрою для діагностики аномалій температури молочної залози.

Основні принципи методу радіотермографії

Мікрохвильова пасивна термографія заснована на прийманні власного радіовипромінювання об'єктів, яке є частиною їхнього теплового випромінювання. Потужність цього випромінювання пропорційна температурі об'єкта.

Розподіл інтенсивності *I* теплового випромінювання нагрітого "абсолютно чорного" тіла з температурою *T* по спектру електромагнітного випромінювання визначається законом (функцією) Планка [16]

$$I \approx \frac{\hbar\omega^3}{8\pi^3 c^2} \left(\exp \frac{\hbar\omega}{kT} - 1 \right)^{-1}, \tag{1}$$

де *h* — стала Планка;

ω — частота;

с — швидкість світла;

k — стала Больцмана.

Як видно з наведеного на **рис. 1** розподілу, радіохвильовий діапазон знаходиться на "хвості" розподілу, а максимум приходиться на ІЧ-область електромагнітного спектра.

Перевага радіотермометрії в порівнянні з ІЧтеплобаченням полягає в більшій глибині зондування. Шар біотканини, який формує випромінювання в ІЧ-діапазоні, складає декілька мікрометрів і цілком знаходиться в шкірному покриві. За



допомогою ж радіотермометрії можна безпосередньо реєструвати підшкірну температуру безконтактним методом.

Глибина, з якої приймається радіовипромінювання, визначається довжиною хвилі радіотермометра та поглинальними характеристиками середовища.

За поглинальною здатністю всі біотканини можна розділити на два типи: перші, з малим вмістом води, характеризуються низьким поглинанням випромінювання, другі, що містять багато води, — високим поглинанням.

Практично глибина зондування може мінятися від 2 до 10 см, а змінювати її можна вибором довжини хвилі. При цьому велика глибина зондування, що забезпечується на хвилях великої довжини, супроводжується втратою просторової роздільної здатності, яка визначається довжиною хвилі. При зондуванні вільного простору гранична роздільна здатність дорівнює половині довжини хвилі. Тому поліпшити її можна лише завдяки організації контактування антени з досліджуваним середовищем або ж використовуючи спеціальні антени.

Однією з найважливіших характеристик радіометричного методу є глибина зондування. У загальному випадку глибина виявлення температурної аномалії не дорівнює товщині скін-шару l_{ck} (глибина, на якій інтенсивність випромінювання зменшується в e^2 разів), оскільки визначається ще й чутливістю апаратури.

Якщо радіотермометр дозволяє реєструвати зміну інтегральної температури δT , а приріст температури ΔT на глибині перевищує δT , тобто $\Delta T > \delta T$, то максимальну глибину l_{max} виявлення такої температурної аномалії можна знайти за формулою

$$l_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi\alpha} \ln \frac{\Delta T}{\delta T} = 0,5 l_{c\kappa} \ln \frac{\Delta T}{\delta T},$$
(2)

де α — показник загасання радіохвиль в біотканині.

Очевидно, що збільшення чутливості радіотермометра підвищує глибину зондування.

В реальній ситуації температурна аномалія у глибині тканини викликає підвищення температури в поверхневих шарах, що обумовлюється теплопровідністю біотканин. Оскільки тканини з високим вмістом води мають велику теплопровідність, що компенсує згасання радіохвиль, це вирівнює тканини з низьким і високим вмістом води за глибиною виявлення температурних аномалій.

Інтенсивність радіотеплового випромінювання шару біологічної тканини на частоті ω визначається ефективною температурою тіла $T_{e\phi}$ і його випромінювальною здатністю χ_{u} :

$$I_{\omega \mu} = B_{\mu}(T_{e\phi}) \cdot \chi_{\mu}(T_{e\phi}), \qquad (3)$$

де B_{μ} — функція Планка,

(5)

Для радіодіапазону функція Планка може бути представлена через наближення Релея – Джонса і для однієї поляризації матиме вигляд

$$B = \frac{kT\omega^3}{8\pi^3c^2} = \frac{kT}{2\pi\lambda^2}.$$

Інтенсивність випромінювання тіла зручно виражати через температуру радіояскравості $T_{\rm g}$, що дорівнює температурі абсолютно чорного тіла, за якої забезпечується ця інтенсивність випромінювання:

$$I_{\omega} = \frac{kT_{\pi}}{2\pi\lambda^2} = \frac{kT\chi_{\omega}}{2\pi\lambda^2},\tag{4}$$

де λ — довжина хвилі, що відповідає частоті ω.

Випромінювання, що приймається від нагрітого тіла, має також складову відбитого фонового випромінювання.

Випромінювальна здатність нагрітого тіла визначається законом Кирхгофа та базується на балансі інтенсивностей випромінювань, які поглинаються та випромінюються тілом. Відповідно, для непрозорого тіла

$$\chi_{\rm m} = 1 - r_{\rm m},$$

де r_ш — коефіцієнт відбиття на частоті ω.

Біологічні тканини мають шарувату структуру, й адекватною моделлю для них є модель плоского шару з деяким розподілом температури за глибиною.

Якщо температура змінюється з глибиною шару, що цікаво для медицини, то температуру радіояскравості необхідно визначати за умови теплового балансу для кожного елементарного шару, в межах якого температуру можна вважати постійною, тобто слід користуватися інтегральною температурою.

Потужність випромінювання радіотермографа залежить від параметрів приймальної антени та характеризується температурою шуму антени. Ця температура дорівнює термодинамічній температурі узгодженого навантаження, потужність теплового випромінювання якого дорівнює потужності випромінювання, що приймається антеною. Це дозволяє виразити антенну температуру T_A через температуру T_g радіояскравості середовища та параметри антени [1]:

$$T_{A} = \frac{\eta}{4\pi} T_{s}(\Omega) G(\Omega) d(\Omega) + T_{0}(1-\eta), \qquad (6)$$

де Ω — тілесний кут;

- $G(\Omega)$ діаграма спрямованості;
- $d(\Omega)$ діаметр антени;
 - η коефіцієнт корисної дії;
 - *T*₀ власна термодинамічна температура.

Зауважимо, що у випадку контактної радіотермографії, коли середовище знаходиться поблизу антени, використання поняття діаграми спрямованості є некоректним, й антенну температуру слід знаходити на основі флуктуаційно-дисипативних співвідношень, задавшись моделлю середовища.

Принципи побудови медичних радіотермографів для неінвазивних досліджень біотканин

З наведених вище особливостей методу термографії витікає, що зміні температури досліджуваного об'єкта на 1°С відповідає зміна випромінюваної спектральної густини потужності приблизно на 10–23 Вт/Гц. Відомо [1, 17], що спектральна густина потужності власних шумів сучасних НВЧ-приймальних пристроїв приблизно в декілька сотень разів вище вказаної величини, тому для вимірювання температури об'єктів за їхнім власним НВЧ-випромінюванням з точністю, кращою ніж 1°С, необхідно застосовувати спеціальні — радіометричні — способи оброблення сигналу.

Для оптимального приймання сигналу необхідно, щоб напруга на виході приймача $U_{_{\rm BHX}}$ була пов'язана з вхідною напругою $U_{_{\rm RX}}$ співвідношенням

$$U_{\rm BHX} = k_{\rm nigc} U_{\rm BX}^2 dt, \tag{7}$$

де $k_{\text{підс}}$ — коефіцієнт підсилення приймального тракту НВЧ-радіометра;

t — час інтеграції сигналу.

З цього витікає, що необхідно забезпечити операції підсилення, квадратичного детектування й інтегрування за часом.

НВЧ-радіометри прийнято характеризувати флуктуаційною чутливістю δiT , тобто величиною перепаду вхідної температури, за якої вихідний сигнал від цього перепаду дорівнюватиме середньоквадратичному відхиленню флуктуацій вхідних шумів на виході приймача. Для ідеального приймача ця величина визначається виразом

$$\delta iT = \frac{T_{\rm m}}{\sqrt{\Delta f \tau}},\tag{8}$$

де Т_ш — шумова температура приймача;

 Δf — смуга приймача за високою частотою;

т — стала часу накопичення вихідного сигналу.

Формула (8) дає величину флуктуаційної чутливості приймача, у якого відсутні флуктуації коефіцієнта підсилення, а середнє значення шуму не відбивається на точності показів. Але в реальних приймачах це не так, і тому їхня флуктуаційна чутливість нижча: для модуляційних приймачів вона погіршується у 1,4–2,8 раз залежно від схеми модуляції, для кореляційних — приблизно в 1,4 рази, а для компенсаційних приймачів її величина дорівнює одиниці. Флуктуаційна чутливість компенсаційного НВЧ-радіометра значно залежить від флуктуації коефіцієнта підсилення, а при спробі його стабілізації погіршується пропорційно кореню квадратному з часу, що витрачається на стабілізацію.

Формула (8) не враховує поглинання сигналу у вхідних ланцюгах радіометра, яке зменшує вхідний сигнал, але додає його шуми до шумів ланцюгів вхідних каскадів радіометра [1, 17].

В радіотермографії переважно використовуються модуляційні НВЧ-радіометри, побудовані як за схемою прямого підсилення, так і за супергетеродинною схемою.

Зазначимо, що точність визначення глибинної температури біологічного об'єкта T_0 за власним НВЧвипромінюванням визначається не тільки похибками вимірювання його потужності, але й умовами проведення вимірювань і точністю апріорних даних щодо випромінювальної здатності досліджуваного об'єкта.

Радіаційна температура $T_{\rm pad}$, яка характеризує потужність власного НВЧ-випромінювання біооб'єкта, пов'язана з інтегральною глибинною температурою $T_{\rm o}$ співвідношенням

$$T_{\rm pail} = \chi T_{\rm o}. \tag{9}$$

Хоча під час досліджень поверхневих температур випромінювальна здатність х може змінюватися мало, ці зміни все одно слід враховувати. При глибинному зондуванні випромінювальна здатність суттєво залежить від структури досліджуваної тканини. Тому, як показали дослідження, в цьому випадку більш точними виявилися методи вимірювання, коли антенна система контактує з досліджуваним об'єктом (і максимально узгоджена з ним). Така методика одержала назву аплікаційної (контактної) радіотермографії на відміну від дистанційної, коли антена знаходиться на деякій відстані від об'єкта.

Особливості взаємодії біологічних тканин з електромагнітним НВЧ-полем

Основним параметром, що визначає радіотеплове випромінювання біотканини, є її діелектрична проникність. Цей параметр прийнято використовувати як комплексну величину: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, де ε_2 визначається провідністю.

Розповсюдження радіохвиль в поглинальному середовищі характеризується довжиною хвилі в цьому середовищі λ_c і товщиною скін-шару l_{ck} . Згідно з [18]

$$\lambda_{\rm c} = 1/n; \tag{10}$$

$$l_{\rm ck} = \lambda/(2\pi\alpha),\tag{11}$$

де *n*, α — відповідно, показники заломлення та загасання радіохвиль;

 λ — довжина хвилі у вільному просторі.

Величини *n* та α пов'язані через ε таким чином:

$$n = \frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}}}{\sqrt{2}}; \qquad (12)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{-\varepsilon_1^2 + \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}}}{\sqrt{2}}.$$
(13)

Визначення діелектричної проникності реальних біотканин залежить від коефіцієнта відбиття при проходженні радіохвиль через зразки біотканини (*in vitro*) або безпосередньо на живому об'єкті (*in vivo*) [17]. Фактично діелектрична проникність визначається вмістом води в тканинах. До тканин з високим вмістом води відносяться шкіра, м'язи, внутрішні органи, біла речовина мозку, кров; з низьким вмістом води — жир, кістковий мозок, кісткові тканини тощо. Найбільший вміст води у крові (83%), м'язах (75%), печінці (71%), нирках (77%), селезінці (75%), в білій речовині мозку (72%).

Моделлю радіотеплового випромінювання може бути модель біотканини з однорідним та неоднорідним середовищем з постійною та змінною глибинною температурою.

Характерним для структури поверхневого шару біотканини є чергування шарів: шкіра, жир, м'язи. Оскільки шкіра та м'язи мають високий вміст води, а значить високу діелектричну проникність, це призводить до відбивання радіохвиль на межі двох шарів. Зміна товщини шарів призводить до варіацій коефіцієнта відбиття від всієї структури і, відповідно, її випромінювальної здатності, яка відповідає співвідношенню

$$\chi = 1 - \rho, \tag{14}$$

де ρ — коефіцієнт відбиття на частоті ω.

Якщо в межах кожного шару можна використовувати однорідну модель, то для елементарної ділянки завтовшки Δl , що знаходиться на глибині l, величина радіотеплового випромінювання пропорційна множнику

$$K = \exp\gamma l \cdot (1 - \exp\gamma l), \tag{15}$$

де ү — коефіцієнт лінійного поглинання біотканини,

- $\gamma = 4\pi x/\lambda;$
- *х* товщина біотканини.

Стосовно шару з аномальним підвищенням температури це означає, що зі збільшенням товщини шару сигнал від цього шару зростає, а зі збільшенням глибини залягання шару сигнал зменшується експоненціально.

З викладеного вище витікає, що радіотермографія дозволяє визначати інтегральні глибинні температури біологічних об'єктів. Ці задачі в загальному випадку досить складні, проте цілком вирішувані в окремих випадках, наприклад при високому ступені гомогенності та відомих біофізичних властивостях досліджуваної тканини.

Вибір оптимальних умов зондування

У радіотермографічних дослідженнях необхідно визначати (обчислювати) функції розподілу температури по глибині досліджуваної тканини або хоча б їхні дискретні (пошарові) значення. При цьому треба зробити декілька зауважень з точки зору оптимізації зондування біологічного середовища за допомогою високочутливих радіометричних приймачів. По-перше: власне електромагнітне випромінювання біооб'єктів необхідно приймати контактним способом — за допомогою контактних антен-аплікаторів для радіотермометричного зондування. При аплікаційному методі виявлення температурних аномалій в товщі біооб'єкта роздільна здатність більша порівняно з вимірюваннями на відстані, адже довжина хвилі в зондованому біологічному середовищі менша, ніж у вільному просторі. Крім того, антену-аплікатор простіше узгодити безпосередньо з зондованим середовищем без прошарку повітря, води або іншої речовини. Методичні питання виключення впливу коефіцієнта відбиття на межі «антена — об'єкт» на точність зондування розглянемо більш ретельно нижче, при формуванні вимог до антени-аплікатора.

По-друге: важливе значення для створення радіотермографічної зондувальної системи має вибір робочої частоти (частот) зондування. Аналіз радіотермометричного методу та особливостей зондування біотканин показав, що оптимальним частотним ліапазоном для зондування біотканин з високим вмістом води (саме такими є, зокрема, тканини молочних залоз) є діапазон від 900 МГц до 4 ГГц. Нижня частота цього діапазону обумовлюється зниженням просторової роздільної здатності зондування (хоча глибина проникнення електромагнітних хвиль у біотканину при пониженні частоти збільшується), а також великою кількістю активних індустріальних радіоперешкод, що надважливо для таких чутливих приладів, як радіометричні приймачі. Верхня частота діапазону обумовлюється зменшенням глибини проникнення електромагнітних хвиль у живу тканину. а також наявністю радіоперешкод, інакше приймальна система буде "забита" активними сигналами мобільних телефонів (близько 1,8 ГГц) та іншими радіоперешкодами.

Таким чином, з указаного частотного діапазону необхідно виділити частотну смугу, де немає активних перешкод.

На вибір робочого частотного діапазону впливає ще один фактор — робоча смуга вхідного НВЧциркулятора, який є необхідним елементом радіометра. На превеликий жаль, частотні смуги наявних циркуляторів є значно більш вузькими, ніж потрібно з точки зору оптимізації процесу радіотермометричного зондування біотканин.

Нами вибір був зроблений, беручи до уваги багаторічний досвід співробітників НВП «Сатурн» в галузі радіотермометрії. Робочу смугу частот радіотермометра було зменшено до 20% її відносної ширини, щоб одержати достатню флуктуаційну чутливість δiT радіометричної системи (див. формулу (8)).

Умови формування антени-аплікатора для радіотермографа

Як при дистанційному, так і при аплікаційному застосуваннях НВЧ-радіометр приймає випромінювання, інтенсивність якого визначається двома процесами — власним випромінюванням досліджуваного об'єкта та випромінюванням НВЧ-радіометра, що відбилося від межі розділу (**рис. 2**). Якщо використовувати аплікаційну методику, випромінювання навколишнього середовища буде еквівалентним випромінюванню вхідних ланцюгів вимірювального приладу (на межі «антена — об'єкт» [18]).

Потужність випромінювання, що приймається НВЧ-радіометром, виражена через температуру T_{o} , з використанням формули (14) може бути описана виразом

$$T_{\rm o} = T_{\rm o} \chi + T_n \rho = T_{\rm o} + (T_n - T_{\rm o})\rho,$$
 (16)

де T_n — шумова температура, відповідна інтенсивності випромінювання приймача при застосуванні аплікаційної методики.

Якщо $T_o = T_n$, то потужність (T_o) , що приймається приймачем, дорівнює потужності, яка випромінюється досліджуваним об'єктом, коли коефіцієнт відбиття r=0. Саме для цього потрібно створювати спеціалізовану антену-аплікатор, а самі ці умови прийнято називати термодинамічною рівновагою, яку ретельно розглянуто у [18–20].

Фактично, при безпосередньому контакті з гомогенним об'єктом дослідження, яким є молочна залоза, антена-аплікатор забезпечує узгодження між цим об'єктом та вимірювальною апаратурою — радіотермографом.

Коли антена має слабкий зв'язок із вільним навколишнім простором, випромінювання у це середовище визначається як коефіцієнт втрат на випромінювання у вільний простір. Для вимірювання коефіцієнта відбиття використовується складна оригінальна модуляція вхідного сигналу [21].



Рис. 2. Схема радіаційного обміну на межі «антена — об'єкт»:

*T*_o, *rT*_o — випромінювання об'єкта і та його частина, що відбилася від межі розділу;

*T*_{rec}, *rT*_{rec} — випромінювання НВЧ-радіометра і та його частина, що відбилася від межі розділу

Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3-4

БІОМЕДИЧНА ЕЛЕКТРОНІКА



Рис. 3. Складальне креслення та реалізовані зразки антенаплікаторів з максимальним і мінімальним розкривом

Аналіз показав, що в умовах різноманіття медикодіагностичних задач необхідні різні технічні підходи до їх розв'язання. Можливо, більш ефективними стануть спеціалізовані радіотермографічні пристрої або системи для вирішення певного кола діагностичних задач в медицині. Тому основними шляхами створення комп'ютерної радіотермографії для медичної діагностики слід визначити такі:

— реалізація приймання випромінювання у смузі частот для вирішення багаточастотної радіотермографії;

— розроблення спеціальної антени-аплікатора з керованою глибиною зондування біооб'єкта.

Для якісного приймання власного та відбитого випромінювань біотканини або водонасиченого середовища особливо важливим є узгодження з ними антени-аплікатора. Хвильовий опір коаксіального НВЧ-тракту складає $Z_0 = 50$ Ом, і саме його необхідно узгодити з хвильовим опором Z_i біотканини. Водночас хвильовий опір Z_i , який залежить від діелектричної проникності біотканини ($\varepsilon = 30 - 70$ [22]), може суттєво відрізнятися від Z_0 . При створенні компактної коаксіально-діелектричної антениаплікатора фахівцями НВП «Сатурн» для забезпечення узгодження між Z_0 та Z_i як діелектрик антениаплікатора було використано плату з кераміки ТБНС У60.128.000 ТУ (**рис. 3**).

Структура створеного радіотермографа

За результатами проведеного аналізу, для побудови радіотермографічної приймальної системи діагностування аномалій молочних залоз була обрана



Рис. 4. Блок-схема та зовнішій вигляд створеного на НВП «Сатурн» радіотермографа:

 1 — антена-аплікатор; 2 — модулятор; 3 — феритовий циркулятор; 4 — приймально-підсилювальний блок; 5, 13, 14 синхронні детектори; 6 — суматор; 7 — поділювач напруги; 8 — реєстратор; 9 — задавальний генератор; 10 — генератор шуму; 11 — поділювач частоти; 12 — комутатор; 15 — блок віднімання; 16 — інвертор; 17 — керований підсилювач; 18 — резистивний датчик температури

Технічні характеристики створеного на НВП «Сатурн» радіотермографа

Діапазон робочої частоти, ГГц	1,2 – 1,5
Поріг температурної чутливості, °С	0,1
Діапазон вимірюваної температури, °С	25 - 42
Глибина зони вимірювань (залежно від типу біотканини), см	2-5
Час вимірювання, с	5
Напруга живлення від мережі змінного струму, В	220,0
Споживана потужність, Вт	< 30

модуляційно-компенсаційна схема, заснована на вимірюванні інтегральної температури та інтегрального коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль від біооб'єкта, а також робочий вхідний діапазон частот — від 1,2 до 1,5 ГГц. Блок-схема радіотермографа, наведена на **рис. 4**, забезпечує пропорційні радіаційній (глибинній) температурі об'єкта покази реєстратора, які не залежать від температури антени, коефіцієнта передачі на межі «антена — об'єкт» та коефіцієнта передачі приймально-підсилювального трак-

БІОМЕДИЧНА ЕЛЕКТРОНІКА

ту радіотермографа. Технічні характеристики створеного НВП «Сатурн» приладу наведено у **таблиці**.

Багаторічний досвід фахівців НВП «Сатурн» в галузі НВЧ-радіоелектроніки дозволив створити сучасний радіотермограф для діагностики захворювань молочної залози у жінок. Важливість цієї проблематики для сучасної медицини підштовхнула авторів поділитися цим досвідом з тими, хто займається розробкою апаратури для хірургії, оториноларингології, ортопедії, педіатрії, гінекології тощо, де вимірювання розподілу температур тіла пацієнта має діагностичну цінність. Наведені в роботі підходи до створення сучасних радіотермографів мають стати у пригоді розробникам медичної апаратури.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М., Наука, 1973.

2. Троицкий В.С., Аранжереев Е.А., Густов А.В. и др. О возможности использования собственного радиотеплового СВЧ излучениия для измерения температуры внутренних органов. *VФH*, 1981, т. 134, вып. 1, с. 155–158.

3. Штейншлейгер В.Б., Мисежников Г.С., Сельский А.Г. Об одном радиофизическом методе обнаружения температурных аномалий внутренних органов человека. *УФН*, 1981, т. 134, вып. 1, с. 163–164.

4. Enander B., Larson G. Microwave radiometric measurements of the temperature inside a body. *Electronics Letters*, vol. 10, no. 15, pp. 317–317, 1974. https://doi.org/10.1049/el:19740250

5. Asimakis N.P., Karanasiou I.S., Uzunoglu N.K. Non-invasive microwave radiometric system for intracranial applications: A study using the conformal l-notch microstrip patch antenna. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, vol. 117, p. 83–101. https://doi. org/10.2528/PIER10122208

6. Sugiura T., Hirata H., Hand J.W. et al. Five-band microwave radiometer system for noninvasive brain temperature measurement in newborn babies: Phantom experiment and confidence interval. *Radio Science*, 2011, vol. 46, iss. 5. https://doi.org/10.1029/2011RS004736

7. Scheeler R., Kuester E.F., Popovic Z. Sensing depth of microwave radiation for internal body temperature measurement. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2014, vol. 62, iss. 3, p. 1293–1303. https://doi.org/10.1109/TAP.2013.2295595

8. Stauffer P.R., Rodriques D.B., Salahi S. et al. Stable microwave radiometry system for long term monitoring of deep tissue temperature. Proc. SPIE 8584, *Energy-based Treatment of Tissue and Assessment VII*, 85840R, 2013. https://doi.org/10.1117/12.2003976

9. Hand J. W., Leeuwen G. M. J. V., Mizushina S. et al. Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling. *Physics in Medicine and Biology*, 2001, vol. 46, no. 7, p. 1885–1903. https://doi.org/10.1088/0031-9155/46/7/311

10. Maruyma K., Mizushina S., Sugiura T. et al. Feasibility of noninvasive measurement of deep brain temperature in newborn infants by multifrequency microwave radiometry. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, vol. 48, no. 11, p. 2141–2147. https://doi.org/10.1109/22.884206

11. Toutouzas K., Benetos G., Koutagiar I. et al. Noninvasive detection of increased carotid artery temperature in patients with coronary artery disease predicts major cardiovascular events at one year: Results from a prospective multicenter study. *Atherosclerosis*, 2017, vol. 262, p. 25–30. https://doi.org/10.1016/j. atherosclerosis.2017.04.019

12. Macdonald A., Land D., Sturrock R. Microwave thermography as a noninvasive assessment of disease activity in inflammatory arthritis. *Clinical Rheumatology*, 1994, vol. 13, p. 589–592. https:// doi.org/10.1007/BF02242999

13. Toutouzas K., Grassos C., Drakopoulou M. et al. First in vivo application of microwave radiometry in human carotids. *Journal of the American College of Cardiology*, 2012, vol. 59, no. 18, p. 1645–1653. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2012.01.033

14. Pentazos G., Laskari K., Prekas K. et al. Microwave radiometry-derived thermal changes of small joints as additional potential biomarker in rheumatoid arthritis. *JCR: Journal of Clinical Rheumatology*, 2018, vol. 24, iss. 5, p. 259–263. https://doi.org/10.1097/RHU.00000000000719

15. Toutouzas K., Synetos A., Nikolaou C. et al. Microwave radiometry: a new non-invasive method for the detection of vulnerable plaque. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, vol. 2, no. 4, 2012. https://doi.org/10.3978/j.issn.2223-3652.2012.10.09

16. Планк М. Избранные труды. М., Наука, 1975, 788 с.

17. Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.Ф. и др. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов. Житомир, издательство «Волынь», 2003, 408 с.

18. Троицкий В.С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тел. *Известия вузов. Сер. Радиофизика*, 1981, т. 24, № 9, с. 1054–1061.

19. Luedeke K.M., Schick B., Koehler J. Radiation balance microwave thermograph for industrial and medical applications. *Electronics Letters*, 1978, vol. 14, iss. 6, pp. 194–196. https://doi.org/10.1049/el:19780129

20. Luedeke K.M., Koehler J. Microwave radiometric system for biomedical 'true temperature' and emissivity measurements. *Microwave Power*, 1983, vol. 18, iss. 3, pp. 277–283. https://doi.org /10.1080/16070658.1983.11689332

21. Гаевский В.С., Маречек С.В., Мешков Ю.В. и др. Радиотермоскоп. Электронная промышленность, 1987, №1, с. 29.

22. Колисниченко М.В., Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Радиометрия СВЧ-диапазона: медицинские аспекты использования. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2003, №5, с. 23–25.

> Дата надходження рукопису до редакції 15.11 2023 р.

Опис статті для цитування:

Гаєвський В. С., Глушеченко Е. М., Лабунський В. В., Туз О. Д. Використання НВЧ-радіометрії у побудові медичних приладів для неінвазивної діагностики. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4, с. 39–46. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2023.3-4.39

Cite the article as:

Gaevskyi V. S., Glushechenko E. M., Labunskyi V. V., Tuz O. D. Designing medical devices for non-invasive diagnostics using microwave radiometry. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 39–46. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.39

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.39 UDC 621.317.07

V. S. GAEVSKYI, E. M. GLUSHECHENKO, V. V. LABUNSKYI, O. D. TUZ

Ukraine, Kyiv, PJSC "SPE "SATURN" E-mail: gen-nto@ukr.net

DESIGNING MEDICAL DEVICES FOR NON-INVASIVE DIAGNOSTICS USING MICROWAVE RADIOMETRY

Temperature is often used among the information required to diagnose the state of a person's internal organs, as pathological processes occurring in the human body are usually accompanied by thermal deviations not only on the surface but also inside the body. Modern medicine needs to improve non-invasive methods of measuring temperature deep in the human body for the purpose of early diagnosis and monitoring of various pathological processes. Medical radiothermography, in particular, allows non-invasive determination of the integral deep temperatures of internal organs. The development of modern radiometric equipment involves solving such complex problems as ensuring high sensitivity of devices, matching the antenna to the biological object, ensuring the required penetration depth, and measuring absolute temperature with an error of at least 0.1°C. Given the importance of this problem, this paper demonstrates the approaches to the development of modern radiothermographs that the authors used in the process of creating a device for diagnosing breast temperature abnormalities.

The study considers the principles and schemes of construction of radiothermographic devices, requirements to the equipment as a whole, as well as to its main components. The authors conclude that it is optimal to use a modulation-compensation scheme of a radiometer for medical radiothermometry based on the measurement of two parameters: the integrated temperature and the integrated coefficient of reflection of electromagnetic waves from a biological object. A schematic diagram of a prototype radiothermograph, as well as its composition and design, is presented. The approaches to the creation of modern radiothermographs presented in this work should be useful for developers of medical equipment for surgery, otorhinolaryngology, orthopedics, pediatrics, gynecology, etc., where measuring the distribution of patient body temperatures is of diagnostic value.

Keywords: microwave, radiometer, temperature, antenna, biological tissue, reflection, radiation.

REFERENCES

1. Esepkina N.A., Korol'kov D.V., Pariysky Yu.N. [Radio telescopes and radiometers] *Radioteleskopy i radiometry*. M., Nauka, 1973. (Rus)

2. Troitsky V.S., Arangereev E.A., Gustov A.B. et al. [On the possibility of using one's own radio-thermal microwave radiation to measure the temperature of internal organs]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1981 vol. 134, iss. 1, pp. 155–158. (Rus)

3. Shteinshleyger V.B., Misezhnikov G.S., Selsky A.G. [About one radiophysical method for detecting temperature anomalies in human internal organs]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1981 vol. 134, iss. 1, pp. 163–164. (Rus)

4. Enander B., Larson G. Microwave radiometric measurements of the temperature inside a body. *Electronics Letters*, vol. 10, no. 15, pp. 317–317, 1974. https://doi.org/10.1049/el:19740250

5. Asimakis N.P., Karanasiou I.S., Uzunoglu N.K. Non-invasive microwave radiometric system for intracranial applications: A study using the conformal l-notch microstrip patch antenna. *Progress In Electromagnetics Research*, 2011, vol. 117, pp. 83–101. https://doi.org/10.2528/PIER10122208

6. Sugiura T., Hirata H., Hand J.W. et al. Five-band microwave radiometer system for noninvasive brain temperature measurement in newborn babies: Phantom experiment and confidence interval. *Radio Science*, 2011, vol. 46, iss. 5. https://doi.org/10.1029/2011RS004736

7. Scheeler R., Kuester E.F., Popovic Z. Sensing depth of microwave radiation for internal body temperature measurement. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2014, vol. 62, iss. 3, pp. 1293–1303. https://doi. org/10.1109/TAP.2013.2295595

8. Stauffer P.R., Rodriques D.B., Salahi S. et al. Stable microwave radiometry system for long term monitoring of deep tissue temperature. Proc. SPIE 8584, *Energy-based Treatment of Tissue and Assessment VII*, 85840R, 2013. https://doi.org/10.1117/12.2003976

9. Hand J. W., Leeuwen G. M. J. V., Mizushina S. et al. Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modelling. *Physics in Medicine and Biology*, 2001, vol. 46, no. 7, pp. 1885–1903. https://doi.org/10.1088/0031-9155/46/7/311

10. Maruyma K., Mizushina S., Sugiura T. et al. Feasibility of noninvasive measurement of deep brain temperature in newborn infants by multifrequency microwave radiometry. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, vol. 48, no. 11, pp. 2141–2147. https://doi. org/10.1109/22.884206

11. Toutouzas K., Benetos G., Koutagiar I. et al. Noninvasive detection of increased carotid artery temperature in patients with coronary artery disease predicts major cardiovascular events at one year: Results from a prospective multicenter study. *Atherosclerosis*, 2017, vol. 262, 25–30. https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2017.04.019

12. Macdonald A., Land D., Sturrock R. Microwave thermography as a noninvasive assessment of disease activity in inflammatory arthritis. *Clinical Rheumatology*, vol. 13, pp. 589–592, 1994. https://doi. org/10.1007/BF02242999

13. Toutouzas K., Grassos C., Drakopoulou M. et al. First in vivo application of microwave radiometry in human carotids. *Journal of the American College of Cardiology*, 2012, vol. 59, no. 18, pp. 1645–1653. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2012.01.033

14. Pentazos G., Laskari K., Prekas K. et al. Microwave radiometryderived thermal changes of small joints as additional potential biomarker in rheumatoid arthritis. *JCR: Journal of Clinical Rheumatology*, 2018, vol. 24, iss. 5, pp. 259–263. https://doi.org/10.1097/RHU.000000000000719

15. Toutouzas K., Synetos A., Nikolaou C. et al. Microwave radiometry: a new non-invasive method for the detection of vulnerable plaque. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, vol. 2, no. 4, 2012. https://doi. org/10.3978/j.issn.2223-3652.2012.10.09

16. Planck M. [Selected Works] *Izbrannyye trudy*. M., Nauka, 1975, 788 p. (Rus)

17. Skripnik Yu.A., Yanenko A.F., Manoilov V.F. et al. [Microwave radiometry of physical and biological objects] *Mikrovolnovaya radiometriya fizicheskaikh i biologicheskikh ob "yektov.* Zhitomir, Publishing house "Volyn", 2003, 408 p. (Rus)

18. Troitsky V.S. On the theory of contact radiometric measurements of the internal temperature of bodies. *Izvestija VUZov. Radiofizika*, 1981, vol. 24, no. 9, p. 1054–1061. (Rus)

19. Luedeke K.M., Schick B., Koehler J. Radiation balance microwave thermograph for industrial and medical applications. *Electronics Letters*, 1978, vol. 14, iss. 6, pp. 194–196. https://doi.org/10.1049/el:19780129

20. Luedeke K.M., Koehler J. Microwave radiometric system for biomedical 'true temperature' and emissivity measurements. *Microwave Power*, 1983, vol. 18, iss. 3, pp. 277–283. https://doi.org/10.1080/1607 0658.1983.11689332

21. Gaevsky B.S., Marechek S.V., Meshkov Yu.V. et al. [Radiothermoscope]. *Electronic Industry*, 1987, no. 1, p. 29. (Rus)

22. Kolisnichenko M.V., Kutsenko V.P., Skripnik Yu.A., Yanenko A.F. Microwave radiometry: medical aspects of use. *Technology and design in electronic equipment*, 2003, no. 5, pp. 23–25. (Rus)

УДК 621.383:548.4

М. С. КУКУРУДЗЯК^{1,2}, А. М. КУКУРУДЗЯК²

Україна, м. Чернівці, ¹Центральне конструкторське бюро «Ритм», ²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича E-mail: mykola.kukurudzyak@gmail.com; makoviychuk.anastasiya@gmail.com

УТВОРЕННЯ ДЕФЕКТІВ НА ПОВЕРХНІ Si-ПІДКЛАДОК В ПРОЦЕСІ ТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ ЗОЛОТА

При виготовленні кремнієвих фотоприймачів помічено деградацію їхніх параметрів після етапу формування контактних площадок методом термічного напилення золота. Під час дослідження зразків у селективному травнику виявлено комплекси структурних дефектів, які сприяли погіршенню параметрів, зокрема зростанню темнових струмів, а іноді й виникненню пробою p-n-nepexody. Дослідження причин появи цих дефектів показало, що вони утворюються внаслідок локального плавлення кремнію при потраплянні на нього "крапель" золота із температурою, більшою за температуру плавлення кремнію, внаслідок кипіння у випарнику. Встановлено, що використання дроту супроводжується інтенсивнішою появою "крапель" золота, ніж при використанні корольків.

Ключові слова: кремній, дислокація, пробій, фотодіод, темновий струм.

Україна є одним із провідних виробників кремнієвих *p-і-п*-фотодіодів (ФД) загального та спеціального призначення. Науково-виробниче об'єднання «Акціонерне товариство ЦКБ Ритм» гідно конкурує на світовому ринку із такими компаніями, як Hamamatsu photonic (Японія), Excelitas Technologies Corp. (Тайвань), First Sensor AG (Німеччина) та ін. Для подальшої спроможності конкурування необхідно постійно поліпшувати параметри продукції, оптимізувати технологію виробництва та використовувати найсучасніші методи та технічні засоби. Ключовим аспектом при цьому є забезпечення високого відсотка виходу придатної продукції, а також пошуки систематичних видів браку та методів їх усунення. Кремнієві фотоприймачі, зокрема *p-i-n-*ФД, є широковживаними сенсорами оптичного випромінювання, а з науково-технічним розвитком постійно зростають вимоги до параметрів та надійності цих елементів твердотільної електроніки.

В процесі виготовлення кремнієвих p-i-nфотодіодів нами фіксувалася деяка деградація параметрів виробів після етапу термічного напилення золота для формування контактних площадок. Зокрема, спостерігалось зростання темнових струмів $I_{\rm T}$ фоточутливих елементів (**ФЧЕ**), розкид величини $I_{\rm T}$ по фоточутливих елементах в багатоелементних ФД та рідше — пробій p-n-переходу [1]. Така деградація параметрів потребувала дослідження для виявлення її причин та механізмів.

Аналіз доступних джерел показує, що проблеми утворення металізованих контактів та електродів активно вивчаються. Зокрема, автори [2] дослідили отримання золотих контактів до CdZnTe й встановили, що більш гладку морфологію має шар золота, утворений термічним напиленням, але при цьому багато частинок виступають над поверхнею, що призводить до більш високої середньоквадратичної шорсткості, ніж у шарах золота, нанесених хімічним способом. У [3] вивчався вплив різних структур контактів на характеристики детекторів CdMgTe. Контактні площадки були виготовлені методом вакуумного випаровування та хімічного осадження з матеріалів Au та Al. Результати показали, що детектори CdMgTe із структурою електродів Au/CdMgTe/Al, утворених методом вакуумного випаровування, мають ліпші електричні властивості. В [4] досліджували вплив методів напилення та типу металевих контактів на дефекти (зокрема, генерацію оксидних плівок), що утворюються на межі розділу «метал — напівпровідник» в детекторах. Встановлено, що при застосуванні термічного напилення Au утворюється більш товста плівка оксиду ТеО₂, ніж у разі методів хімічного осадження. Хімічно осаджений Аи має більшу взаємну дифузію між контактом і матеріалом CdZnTe, ніж отриманий методами випаровування. В [5] розглянуто низку типових механізмів деградації термоелектричних матеріалів у процесі їх функціонування у складі термоелектричних генераторних модулів. Серед них дифузія та самодифузія у термоелектричних матеріалах та контактних структурах, втрата легувальних домішок термоелектричними матеріалами внаслідок сублімації, утворення у контактних структурах інтерметалічних сполук, накопичення структурних дефектів під впливом теплових та механічних навантажень, механічне руйнування термоелектричних гілок, контактних структур та інших елементів конструкції модулів, хімічна взаємодія складових термоелектричних матеріалів з іншими елементами конструкції модулів.

При всьому цьому, серед літературних джерел не було знайдено результатів досліджень погіршення

параметрів ФД після термічного напилення Au, з чим стикнулися автори під час виготовлення кремнієвих p-i-n-фотодіодів. Тому метою цієї роботи було встановлення причин такого погіршення, а також пошук способів його уникнення.

Експериментальні зразки та методика проведення досліджень

Дослідження проводились на кремнієвих чотириелементних *p*-*i*-*n*-ФД з охоронним кільцем, призначених для детектування випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 1064$ нм. ФД виготовлялись за дифузійнопланарною технологією згідно з технологічними режимами, наведеними у [6]. Вихідним матеріалом слугував монокристалічний бездислокаційний кремній р-типу орієнтації [111] з питомим поверхневим опором $\rho \approx 18$ —22 кОм·см та часом життя нерівноважних носіїв заряду $\tau \approx 1.8 - 2.2$ мс. Технологічний процес складався з комплексу термічних операцій та фотолітографій: напівпровідникові підкладки окислювались; проводилась фотолітографія для створення вікон під дифузію фосфору; дифузія фосфору (загонка) в лицьову сторону для створення ФЧЕ та охоронного кільця n⁺-типу; розгонка фосфору в атмосфері кисню для перерозподілу легувальної домішки, збільшення глибини *n*⁺-*p*-переходу та утворення просвітлювального покриття; дифузія бору у зворотну сторону підкладки для створення омічного контакту p^+ -типу; фотолітографія для створення контактних вікон; напилення Cr-Au на лицьову та зворотну сторони.

Плівки Au з адгезійним підшаром Cr наносились термічним напиленням у вакуумі при значенні тиску P = 10 - 5 мм рт. ст. та температурі підкладок T = 200°C з подальшим впалюванням.

Відомо, що причинами зростання $I_{\rm T}$ можуть бути механічні пошкодження поверхні кристалів під час операції металізації чи погана хімічна обробка, але в нашому випадку ці причини виключаються, оскільки до і після термічного напилення проводився контроль зовнішнього вигляду кристалів. Крім того, у випадку неналежної хімічної обробки адгезія металу до кремнію була б поганою, подібною до напилення золота на кремній без підшару хрому (чи з шаром товщиною ≤ 10 нм [7]), як це видно з **рис. 1**.



Рис. 1. Кристал ФД з поганою адгезією Аи

Для дослідження структурної досконалості поверхні підкладок після операцій напилення проводилось селективне травлення в розчині Сіртля [8]. Морфологія поверхні Au та Si досліджувалась за допомогою мікроскопів різного збільшення та атомно-силового мікроскопа NT-206. Темнові струми ФД вимірювались при напрузі зміщення $U_{3M} = 120$ B.

Результати досліджень та їх обговорення

Характер зростання $I_{\rm T}$ встановлювався за вольтамперними характеристиками (**BAX**) зразків, які були придатні до вакуумного напилення, та відбракованих після металізації.

Крива *1* на **рис. 2** відповідає ВАХ придатного кристала (придатного ФЧЕ) ФД, криві 2, 3 відбракованих за різних причин. Крива 2 отримана у випадку збільшення $I_{\rm T}$ через поверхневу та об'ємну генераційні складові темнового струму, які зростають при збільшенні кількості структурних дефектів чи збільшенні їх перерізу захоплення [6]. Крива 3 відповідає пошкодженню кристала дефектами, які зруйнували структуру *p*-*n*-переходу або утворили локальне збільшення його глибини, що стало місцем підвищеної напруженості електричного поля. Відповідно, ці фактори призвели до пробою *p*-*n*-переходу при високих U_{3M} [9].



Рис. 2. Обернені гілки ВАХ фотодіодів з придатним (1) та бракованими (2, 3) кристалами

Для визначення причин зростання темнового струму та пробою p-n-переходу досліджувалась структурна досконалість та морфологія пластин після процесу металізації. На поверхні підкладок після напилення Au виявлено локальні потовщення плівки золота, спричинені кипінням металу у випарнику та потраплянням "крапель" Au на підкладки (**рис. 3**, a, δ). В місцях локалізації цих "крапель" утворювався товстіший, часто гостроконечний, шар золота, який потребував тривалішого травлення під час фотолітографії. Це призводило до розтравлення і, як наслідок, зміни заданої форми та розміру контактних площадок. Описані утворення можуть та-



Рис. 3. Зображення "крапель" Au (*a*, б) та порушення структури кремнію після їх механічного знімання (в)



Рис. 4. Зображення порушеної поверхні підкладок після селективного травлення



кож утворювати подряпини на фотошаблонах. При механічному зніманні "крапель" спостерігалось порушення структури кремнію, що свідчило про вплавлення Au в підкладку (рис. 3, *в*).

Для дослідження дефектоутворення на поверхні пластин, спричиненого зазначеним явищем, браковані зразки оброблялись в селективному травнику. Послідовно стравлювалися шари Au, Cr та SiO₂. Під час огляду поверхні бракованих кристалів під мікроскопом з різним збільшенням були виявлені комплекси структурних дефектів у формі кратерів, що являли собою скупчення хаотично розміщених дислокацій та точкових дефектів (**рис. 4**). Встановлено, що напилення Au з дроту супроводжується інтенсивнішим "засміченням" підкладок "краплями" золота, ніж при використанні корольків. Визначення механізму цього явища потребує додаткових досліджень.

Для оцінки морфології поверхні Au після обох варіантів напилення зразки досліджувались за допомогою атомно-силового мікроскопа. Як видно з **рис. 5**, шорсткість поверхні у випадку напилення з дроту значно вища, ніж при напиленні з корольків (рельєф поверхні на рис. 5, *в* отримано хімікодинамічним поліруванням Si-підкладок).

Висновки

Дослідження показали, що під час термічного напилення Аи можуть виникати локальні потовщення плівки золота, спричинені кипінням металу у випарнику та потраплянням його "крапель" на підкладку з вплавленням Аи у підкладку. В результаті цього утворюються комплекси структурних дефектів у формі кратерів, що являють собою скупчення хаотично розміщених дислокацій та точкових дефектів, які можуть сприяти погіршенню темнових струмів ФД чи пробою *p-n*-переходу. Оскільки напилення із дроту супроводжується інтенсивнішим "засміченням" підкладок "краплями" золота, ніж при використанні корольків, можна рекомендувати проводити напилення з дроту для зворотної сторони підкладок, де дефектоутворення є менш критичним, а на лицьову сторону — напилення із корольків.

Для уникнення чи мінімізації утворення описаних дефектів можна проводити напилення із закритих випарників або збільшити час напилення на заслінку при плавленні золота, однак ці методи збільшують розхід дорогоцінного металу. Також можна використовувати інші види напилення, які забезпечують належну якість та адгезію отриманих плівок, зокрема іонно-плазмове чи катодне напилення.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Кукурудзяк М. С., Кукурудзяк А. М. Дефектоутворення на поверхні кремнієвих підкладок при термічному напиленні золота. *Труди 24-ї МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, 2023, Україна, Одеса, с. 101–102.

2. Bell S. J., Baker M. A., Duarte D. D. et al. Comparison of the surfaces and interfaces formed for sputter and electroless deposited gold contacts on CdZnTe. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, part A, pp. 1257–1270. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.077

3. Yu P., Gao P., Jiang B. et al. Effects of electrode fabrication on electrical properties of CdMgTe room temperature radiation detectors. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2023, vol. 153, article no. 107178. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.107178

4. Zheng Q., Dierre F., Franc J. et al. Investigation of generation of defects due to metallization on CdZnTe detectors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, vol. 45, no. 17, article no. 175102. https://doi. org/10.1088/0022-3727/45/17/175102

5. Горський П. В. Типові механізми деградації термоелектричних матеріалів та шляхи зниження їх впливу на надійність термоелектричних модулів. *Фізика і хімія твердого тіла*, 2022, т. 23, № 3, с. 505–516. https://doi.org/10.15330/pcss.23.3.505-516

6. Кукурудзяк М. С., Добровольський Ю. Г. Кремнієвий *p–i–n*фотодіод із підвищеною імпульсною чутливістю. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2021, № 1–2, с. 61–67. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.61

7. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V. Influence of chromium sublayer on silicon P-I-N photodiodes responsivity. *Proc. SPIE 12126, Fifteenth International Conference on Correlation Optics*, Ukraine, Chernivtsi, 2021, 121261V. http://dx.doi.org/10.1117/12.2616170

8. Abdullin F. A., Pautkin V. E., Pecherskaya E. A. et al. Application of the selective silicon etching methods for estimation of the wafers quality in the micromechanical sensors. In 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), Prague, Czech Republic, 2019, pp. 1–4. http://dx.doi.org/10.1109/SED.2019.8798467

9. Setera B., Christou A. Challenges of overcoming defects in wide bandgap semiconductor power electronics. *Electronics*, 2022, vol. 11, iss. 1, article no. 10. http://dx.doi.org/10.3390/electronics11010010

> Дата надходження рукопису до редакції 30.04 2023 р.

Опис статті для цитування:

Кукурудзяк М. С., Кукурудзяк А. М. Утворення дефектів на поверхні Si-підкладок в процесі термічного напилення золота. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4, с. 47–51. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.47

Cite the article as:

Kukurudziak M. S., Kukurudziak A. M. Defects formation on the surface of Si-substrates during thermal sputtering of gold. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 47–51. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.47

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.47 UDC 621.383:548.4 M. S. KUKURUDZIAK^{1,2}, A. M. KUKURUDZIAK²

Ukraine, Chernivtsi, ¹Rhythm Optoelectronics Shareholding Company, ²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

> E-mail: mykola.kukurudzyak@gmail.com; makoviychuk.anastasiya@gmail.com

DEFECTS FORMATION ON THE SURFACE OF SI-SUBSTRATES DURING THERMAL SPUTTERING OF GOLD

Silicon photodetectors, in particular p-i-n photodiodes, are widely used as sensors of optical radiation. With technological advances, the requirements for the parameters and reliability of these elements of solid-state electronics are increasing sharply, thus improving these characteristics is an important task. During the production of silicon photosensors, parameters were observed to degrade after the stage of forming contact pads by thermal sputtering of chrome-gold. Examination of the samples in the selective etchant allowed discovering the complexes of structural defects, which contributed to the deterioration of the parameters, in particular, the growth of dark currents. When investigating the causes of the appearance of these defects, it was established that they were formed as a result of local melting of silicon when gold "drops" hit it with a temperature higher than the melting temperature of silicon due to boiling in the evaporator. It was established that the use of wire is accompanied by a more intensive appearance of gold drops than when using beads. It was also noticed that the roughness of the morphology in the case of sputtering from a wire is significantly higher than in the case of sputtering from beads. It is noted that after the metallization is formed, photolithography is performed on the front side of the substrates to form contact pads, and considering the possibility of etching due to the presence of gold thickenings, it is better to spray on the front side from crowns. Wire spraying should be used for the reverse side of substrates, where defect formation is less critical. The formation of the substrates defects are previous spraying on the shutter during gold melting.

Keywords: silicon, dislocation, breakdown, photodiode, dark current.

REFERENCES

1. Kukurudzyak M.S., Kukurudzyak A.M. Defect formation on the surface of silicon substrates during thermal sputtering of gold. *Proc.* of the 24th ISPC "Modern Information and Electronic Technologies", 2023, Ukraine, Odesa, pp. 101–102. [Ukr]

2. Bell S. J., Baker M. A., Duarte D. D. et al. Comparison of the surfaces and interfaces formed for sputter and electroless deposited gold contacts on CdZnTe. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, part A, pp. 1257–1270. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.077

3. Yu P., Gao P., Jiang B. et al. Effects of electrode fabrication on electrical properties of CdMgTe room temperature radiation detectors. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2023, vol. 153, article no. 107178. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.107178

4. Zheng Q., Dierre F., Franc J. et al. Investigation of generation of defects due to metallization on CdZnTe detectors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, vol. 45, no. 17, article no. 175102. https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/17/175102

5. Gorskyi P. V. Typical mechanisms of degradation of thermoelectric materials and ways of reducing their influence on the reliability of thermoelectric modules. *Solid State Physics and Chemistry*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 505–516. https://doi.org/10.15330/pcss.23.3.505-516 [Ukr]

6. Kukurudziak M. S., Dobrovolskyi Y. G. Silicon *p–i–n* photodiode with increased pulse sensitivity. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 1–2, pp. 61–67. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2021.1-2.61 [Ukr]

7. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V. Influence of chromium sublayer on silicon P-I-N photodiodes responsivity. *Proc. SPIE 12126, Fifteenth International Conference on Correlation Optics*, Ukraine, Chernivtsi, 2021, 121261V. http://dx.doi.org/10.1117/12.2616170

8. Abdullin F. A., Pautkin V. E., Pecherskaya E. A. et al. Application of the selective silicon etching methods for estimation of the wafers quality in the micromechanical sensors. In 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), Prague, Czech Republic, 2019, pp. 1–4. http://dx.doi.org/10.1109/SED.2019.8798467

9. Setera B., Christou A. Challenges of overcoming defects in wide bandgap semiconductor power electronics. *Electronics*, 2022, vol. 11, iss. 1, article no. 10. http://dx.doi.org/10.3390/electronics11010010

UDC 621.315.592.3

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.52

O. I. KONDRIK, D. A. SOLOPIKHIN

Ukraine, Kharkiv, National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology" E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

INFLUENCE OF THE CONTENT OF IMPURITIES AND STRUCTURAL DEFECTS ON THE PROPERTIES OF THE Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V-BASED DETECTOR

The paper highlights the results of quantitative studies of the influence of the content of impurities and structural defects on the electrophysical and detector properties of $Cd_{0,9}Mn_{0,1}Te:V$ — resistivity and concentrations of free charge carriers, life time of nonequilibrium charge carriers τ , charge collection efficiency η . The optimal ranges of energy change and deep donor concentration, which ensure a high-resistive state and acceptable values of τ and η , are established. The authors study the compensation of cadmium vacancies with vanadium admixture.

Keywords: CdMnTe, detector properties, simulation, structure defects, deep levels.

Cadmium manganese telluride is a direct band gap II-VI compound semiconductor with wide forbidden band, adjustable lattice parameters and a Mn segregation coefficient close to 1. Thus, $Cd_{1-r}Mn_rTe(CMT)$ is one of the new CdTe-based materials currently being developed, and it is considered as a promising semiconductor material for X-ray and gamma-ray detectors designed to operate at room temperature [1-4]. The main problem in the development of radiation detectors based on CMT is to produce single crystals free of defects. Crystal defects and impurities introduce electrically active energy levels into the bandgap, which deteriorate the charge transport properties of the detector with a decrease in the lifetime of nonequilibrium electrons τ_n and holes τ_n due to trapping phenomena [5, 6] and, as a result, incomplete charge collection. CMT single crystals usually have structural defects such as Te inclusions [7], which significantly deteriorate the detector performance. Such defects, however, are effectively eliminated using multi-step post-growth annealing method [2] or by applying special thermal regime for three-zone tubular furnace [8]. The transport properties of CMT are also strongly influenced by point defects which, like tellurium inclusions, introduce the deep energy levels into the band gap of the semiconductor. Thus, the levels located inside the band gap (0.81-0.85 eV) were found in CMT crystals [9], and these traps together with deep donors $(E_{DD}=0.78-0.84 \text{ eV})$, according to an earlier study [9], should play a significant role in the compensation in these materials, which was confirmed by model results [10]. It was also concluded that the high content of residual impurities in manganese is an obstacle to obtaining highly efficient CMT-based detectors [11]. Thus, CMT has limitations that prevent it from being fully utilized in the cost-effective production of large-volume homogeneous sensors.

The most detrimental structural defects for CMT transport characteristics are cadmium vacancies V_{Cd}^{2-} , which significantly reduce resistivity ρ , the lifetime of nonequilibrium charge carriers τ , and the charge collection efficiency η [10]. To compensate for these doubly charged defects, alloying impurities V, In, Al are introduced [9, 12–14]. Donor impurities of transition metals can also enter into the CMT matrix, which can significantly affect ρ , τ_p , η . The radiation resistance of CdMnTe-based detectors may also depend on the initial state of the matrix: the degree of purity and structural perfection.

CdMnTe of detector quality possess a high resistivity $\rho (\approx 10^{10} \,\Omega \cdot cm)$. It greatly complicates the experimental study of the influence of such micro-parameters for impurities and defects as the positions of their energy levels E_i in the band gap, the capture cross-sections of nonequilibrium charge carriers σ_i , and the concentrations N_i on the resistivity of the detector and its charge collection efficiency n. These micro-properties also significantly affect such important characteristics as the products of mobility μ_n by the lifetime τ_n for electrons $\mu_n \cdot \tau_n$ and those for holes $\mu_n \cdot \tau_n$. Simulation of "macroscopic" characteristics of detector materials (ρ , $\mu_n \tau_n$, $\mu_n \tau_n$, η) using "microscopic" parameters allows, by comparing the calculated values with experimentally measured "macrovalues", to understand the mechanisms of changes in the electrophysical and detector properties of CdMnTe depending on the concentration of impurities and defects. In this regard, the use of mathematical and computer modeling based on known experimental results and proven physical models as an additional research tool is quite relevant. The initial composition and "microscopic" parameters of CMT defects were experimentally studied in the most detail in paper [14] using the Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V material. The results of this

FUNCTIONAL MICRO- AND NANOELECTRONICS

work were taken as the basis and initial parameters for our model study.

The aim of the work was to determine by computer simulation the nature of the effect of background and alloying impurities and structural defects on the electrophysical and detector properties of $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$.

Models and materials

The main parameters of the i^{th} deep levels of defects, which determine lifetime of nonequilibrium electrons and holes as well as charge collection efficiency in the Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te-based detectors, experimentally studied in [14], are the Ni concentration, the capture cross-section σ_i and the position in the band gap (activation energy) E_i . Experimental studies of the band-to-band recombination rate in wide-gap semiconductors [15] showed that the capture and recombination of nonequilibrium electrons and holes at deep levels of impurities and defects have a decisive effect on their lifetime in such materials and, consequently, on the charge collection efficiency in detectors based on them. Therefore, to estimate the lifetime of nonequilibrium charge carriers, the Shockley-Read recombination model [16] was used. In [14], the TSC (thermally stimulated current) method was used to determine the capture cross sections σ_i , when the contribution of all levels to the currents emitted into the corresponding zones was simultaneously taken into account. These data made it possible to properly use the Shockley-Read model to calculate τ_n , τ_p correctly.

The applied models and their testing are described in detail in [17]. The electroneutrality equation was derived taking into account all impurities and defects experimentally registered in [14]. This equation has been solved numerically with respect to the Fermi level F, and concentrations of free electrons (*n*) and holes (*p*) were determined under parabolic zone approximation. The electron mobility μ_n was calculated under the pulse relaxation time approximation (tau approximation) with taking into account the scattering mechanisms at ionized and neutral centers, acoustic, piezoelectric and optic phonons. The mobility of holes μ_p was considered constant and equal to 100 cm²/(V·s). The specific conductivity was calculated using the formula $e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p$, and the resistivity done as its reciprocal quantity. The charge collection efficiency of the detector was determined according to Hecht's equation [18, p. 489]. The distance between the detector electrodes was assumed to be 5 mm, and the electric field strength was 1000 V/cm.

The initial composition of technological and background impurities and defects in CMT was adopted mainly based on the results of paper [14], where the TSC method was used to study the $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V (**CMT:V**) crystal grown by the Te solution vertical Bridgman method. The resulting composition, which is presented in the **Table** for sample CMT:V, ensured the achievement of a high-resistive state $\rho \approx 10^{10} \Omega \cdot cm$ at the concentration of the substitutional vanadium donor impurity of $1 \cdot 10^{16}$ cm⁻³.

The first column of the table shows the levels of the CMT:V material, which are denoted in [14] by T_i . The second column shows the values of the concentrations of the corresponding defects, used in the model study. The third column shows the values of energy levels E_T and the fourth one — the capture cross sections σ of non-equilibrium charge carriers. Explanations of the nature of defects taken from [14] are displayed in the fifth column. The E_T energies of the donor defects levels (electron traps) are measured from the conduction band bottom,

Parameters of the deep trap levels obtained from the TSC spectrum by the SIMPA method in the $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V$ crystal

Trap	Concentration, cm ⁻³	E_T , eV	σ, cm ²	Origins [14]
T_1	$pprox 1.0 \cdot 10^{15}$	0.077	$1.6 \cdot 10^{-22}$	Vanadium instead of cadmium V_{Cd}^+
<i>T</i> ₂	$2.3 \cdot 10^{14}$	0.159	$1.2 \cdot 10^{-20}$	Dislocation related
<i>T</i> ₃	1.0.1015	0.174	$1.5 \cdot 10^{-20}$	$[O_{Te}^{-}V_{Cd}]^{-/2-}$ complex
T_4	7.9·10 ¹⁵	0.254	$7.2 \cdot 10^{-18}$	Acceptor structural defects
T ₅	2.6.1015	0.278	$1.6 \cdot 10^{-17}$	Donor V-related electron trap
T_6	6.9·10 ¹⁴	0.294	$1.1 \cdot 10^{-17}$	Acceptor X level
<i>T</i> ₇	2.9.1014	0.320	$6.0 \cdot 10^{-18}$	Te _{Cd} complex
T ₈	$1.8 \cdot 10^{14}$	0.350	6.9.10-18	$[Te_{Cd}^{-2}V_{Cd}]$ complex
T_9	7.0·10 ¹⁴	0.447	9.9·10 ⁻¹⁷	$V_{\rm Cd}^+$ -related defects
T ₁₀	2.6.1014	0.460	$1,7 \cdot 10^{-17}$	$[\mathrm{Te}_{\mathrm{Cd}}^{-2} V_{\mathrm{Cd}}]^{2-\!/-}$ complex
<i>T</i> ₁₁	4.1.10 ¹⁴	0.512	9.9·10 ⁻¹⁸	Cadmium vacancies V_{Cd}^{2-}
<i>T</i> ₁₂	4.8·10 ¹⁵	0.620	6.3.10-18	Mn-related
T ₁₃	$1.3 \cdot 10^{16}$	0.650	3.0.10-17	V-related hole trap
E _{DD}	1.3.10 ¹⁶	0.960	$1.0 \cdot 10^{-18}$	Deep donor energy derived from dark current characteristics

and those of acceptors (hole traps) are measured from the valence band top. The width of the band gap E_G for $Cd_{1-x}Mn_xTe$ at a room temperature of 20°C was determined by the formula $E_G = 1.45 + 1.45x$ eV [19]. After entering the composition of impurities and defects indicated in the Table into the model program, the electrophysical properties of $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te$:V were calculated for the vanadium concentration $N(V)=1.25\cdot10^{16}$ cm⁻³ at $T=20^{\circ}C$, which turned out to be close to the values measured experimentally in [14]. The calculations allowed obtaining the electronic conductivity with the ratio n/p=20, resistivity $\rho=6.65\cdot10^{10} \Omega\cdot cm$, the product of electron mobility by the lifetime of nonequilibrium electrons $\mu_n \cdot \tau_n = 4.8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$.

Results and discussions

Despite the results published in some papers [2, 9, 13, 14], accurate experimental measurement of impurity and defect concentrations in wide-band CdMnTe is still unattainable due to the high resistivity ($\approx 10^{10} \ \Omega \cdot cm$) of the detector quality material. Therefore, to quantitatively study the electrophysical and detector properties of Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V, the resistivity of this material was modeled depending on the change in its composition. The highly resistive state of Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te necessary for the detector was achieved by compensating its intrinsic acceptor defects (in particular, doubly charged cadmium vacancies V_{Cd}^{2-}) by introducing a shallow donor impurity [9]. Vanadium acted as such an admixture. But the main contribution to obtaining a semi-insulating material is made by a deep donor marked in the table by T_{14} . Its energy level of 0.96 eV relative to the conduction band was measured experimentally in [14]. It is of interest to investigate the behavior of ρ in Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V within wide ranges of energies and concentrations of the deep



Fig. 1. Dependence of the resistivity of $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V on the energy and concentration of the deep donor at the temperature of 20°C (the energy E_{DD} is counted relative to the top of valence band E_V)

donor. **Fig. 1** shows the three-dimensional dependence of the decimal logarithm of the resistivity of the referred above detector material on the concentration of deep donor and its energy level position in the band gap. The figure demonstrates that the maximum possible resistivity of the studied material can reach $3 \cdot 10^{11} \Omega \cdot cm$, although in [14] the largest measured value ρ of the middle part of the ingot was $6.185 \cdot 10^{10} \Omega \cdot cm$ (see section 3.3.1). The maximum $\rho = 2.938 \cdot 10^{11} \Omega \cdot cm$ was reached at the donor energy $E_{DD} = 0.843$ eV relative to the top valence band, or $E_{DD} = 0.752$ eV, counted from the conduction band. And the minimal $\rho \ge 10^{10} \Omega \cdot cm$ necessary for detector-quality material was achieved at $E_{DD} = E_V + 0.743$ eV.

Fig. 1 also shows that there are two extended maximums of ρ , the main being at $E_{DD} = 0.86$ eV and the secondary one at $N_{DD} = 2.5 \cdot 10^{15}$ cm⁻³, which are almost identical in height. The first appears due to the compensation of acceptor levels by deep donors represented by the T_{14} level as well as T_{12} . The main contribution to the achievement of the high-resistance state is provided by T_{14} , but a certain influence is also exerted by the deep donor level of T_{12} . The latter, according to the authors [14], is related to the introduction of manganese. The second extended maximum occurs due to the compensation of shallow acceptor levels T_2 , T_3 , T_4 by the total number of donors, primarily by the vanadium impurity. The change of V content only by 1.10¹⁴ cm⁻³, causes a decrease in the value of ρ in this maximum by approximately one order of magnitude. In this way, it is almost impossible to get into the zone of high p of lateral maximum by changing the content of N_{DD} or alloying vanadium due to the too narrow range of the corresponding concentrations. It can also be seen that the existence of the lateral maximum does not depend on the E_{DD} energy of the level T_{14} at the energy $E_{DD} \ge 0.86$ eV, when its position in the band gap becomes not deep enough to ensure the highly resistive state of the detector material. Under these conditions, there is also a compensation of deep acceptors, primarily T_{13} , by deep donors with energy levels from 0.85 to 1.4 eV relative to the valence band. In this case, there is a fairly wide plateau with a resistivity of $2 \cdot 10^9 \ \Omega \cdot cm$ and an electronic conductivity that may be required for the corresponding devices.

It should be noted that one of the problems of producing detector-quality high-resistance CdMnTe materials is the compensation of the effect of acceptor defects, especially cadmium vacancies V_{Cd}^{2-} with electronic conductivity at $n \ge p$. Fig. 2 shows the three-dimensional dependences in the concentration of electrons n and holes pon the energy E_{DD} and concentration of the deep donor N_{DD} . (The range of N_{DD} change is the same as in Fig. 1, and the E_{DD} varies within 0.2–1.2 eV.)

Fig. 2, *a* shows a gentle plateau in the dependence of $\lg n (E_{DD}, N_{DD})$ when N_{DD} changes within $(2-5)\cdot 10^{15}$ cm⁻³ and E_{DD} within 1,0-1.2 eV. This plateau arises due to the process of the total compensating



Fig. 2. Dependences of the concentrations of electrons (*a*) and holes (*b*) of $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V on the energy and concentration of the deep donor at the temperature of 20°C (the energy E_{DD} is counted relative to the top of valence band E_V)

effect of V_{Cd}^{2-} cadmium vacancies by vanadium impurities and donor defects with the energy $E_{DD} > E_V + 1.0$ eV. In Fig. 2, *b* in the dependence of $lgp(E_{DD}, N_{DD})$ in the specified ranges of E_{DD} and N_{DD} changes, a corresponding gentle plateau is also observed, but with an inverted slope. The flat surfaces in these pictures at $E_{DD} < E_V + 0.65$ eV characterize the low-resistance state of the material with hole conductivity.

To reduce the background noise of the detector, a material with hole conductivity and high-resistive state of $\approx 10^{10} \ \Omega \cdot cm$ is needed. The analysis of the model research showed that this condition for $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V is satisfied at the deep donor concentration of $1 \cdot 10^{16} \ \Omega \cdot cm$ and within the range of its energies relative to the valence band $0.70 < E_{DD} < 0.775$ eV. Under these conditions, the p/n ratio is within 20–200, and ρ varies within $(0.5-5.0) \cdot 10^{10} \ \Omega \cdot cm$. According to the vast majority



Fig. 3. Dependences of the resistivity (a) and concentration of free holes (b) of $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V on the concentrations of acceptor defects of cadmium vacancies and shallow donor vanadium impurities

of researchers, it is the doubly charged cadmium vacancies $V_{\rm Cd}^{2-}$, which can reduce the specific resistance and charge collection of the detector, have the most negative effect on the operational characteristics of such material. **Fig. 3** shows the dependence of the specific resistance of $\rm Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V and the concentration of free holes on the concentration of doubly charged cadmium vacancies $V_{\rm Cd}^{2-}$ and the donor impurity of vanadium. The concentration of the deep donor T_{14} (see the Table) is $1.3 \cdot 10^{16}$ cm⁻³. The maximal theoretically possible resistivity reaches $3 \cdot 10^{11} \ \Omega \cdot cm$. Fig. 3 also shows that the value of ρ is significantly affected by the content of the vanadium impurity which acts as a compensating shallow donor for cadmium vacancies T_{11} and hole trap T_{13} . When the vanadium content increases by only one order of magnitude, that is from $3 \cdot 10^{15}$ to $3 \cdot 10^{16}$ cm⁻³, the value of ρ

FUNCTIONAL MICRO- AND NANOELECTRONICS

time, the concentration of free holes increases rapidly (see Fig. 3, b) due to the influence of uncompensated acceptors, both shallow and deep ones. The high-resistance state is demonstrated by wide plateaus in Fig. 3 a, b. Compensation of $V_{\rm Cd}^{2-}$ is displayed in both figures by an inclined plane to the left of the high-resistance state. The compensation of the T_{13} hole trap is demonstrated by a gentle plateau with $\rho = 10^8 - 10^9 \,\Omega \cdot \mathrm{cm}$ to the right of the region of maximal ρ . In this high-resistance region, which is not always suitable for a detector-quality material, pure hole conduction occurs with the ratio $p/n \approx 0.8 \cdot 10^7$.

To complete the study, the influence of cadmium vacancies on the collection of detector charges should be investigated within the framework of the adopted model. Fig. 4 shows the dependence of charge collection efficiency η on the concentration of the vanadium impurity for different contents of cadmium vacancies. In the calculations, the starting point of the drift of nonequilibrium charges was located in the immediate vicinity of the cathode at the distance of 0.5 mm. For this reason, the main contribution to the signal and the value of η was given by the drift of nonequilibrium electrons, and the maximal value of the charge collection efficiency was about of 0.7 (see Fig. 4). In the case when the starting point of charge drift was at the middle of the inter-electrode distance of the flat detector, the value of η did not exceed 0.55, which is significantly less than in $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$, where η quantity in the initial state was about 0.9 [20]. The initial concentration of V_{Cd}^{2-} (curve *I*) was taken equal to $4.1 \cdot 10^{14}$ cm⁻³, as measured in [14], with its gradual increase to $5 \cdot 10^{16}$ cm⁻³. In the range of the vanadium content changes mentioned in Fig. 4, the largest resistivity of Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V in the initial state $(N(V_{Cd}^{2-}) = 4.1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3})$ is observed at $N_D(V^+) = (5-6) \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and is equal to $3 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$. However, even at $N(V_{Cd}^{2-}) = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \rho = 5 \cdot 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$,

and at $N(V_{Cd}^{2-})=2\cdot 10^{16}$ cm⁻³ the value of ρ does not exceed $1\cdot 10^3 \ \Omega \cdot \text{cm}$, while the detector material must be at least $10^{10} \ \Omega \cdot \text{cm}$. In Fig. 4, there is a rather noticeable increase in charge collection at $N_D(V^+)=7.5\cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ for curve 5. Such an increase occurs at the moment when the Fermi level, in the process of its displacement in the band gap when the concentration of electrically active impurities and defects changes, is far from the energy levels of the traps of nonequilibrium charge carriers. In this case, the capture of charges decreases, and the value of η increases.

During the production of CMT single crystals, background impurities can enter their volume together with the original components, such as interstitial impurities or transition metals, which act as deep donors. This occurs, for example, when CdTe and CdZnTe are produced [20, 21]. Unfortunately, we were unable to find any detailed information on research results of the nature of such impurities in CdMnTe. However, it is possible to investigate the influence of unspecific donor impurities with the different energy levels in the CdMnTe band gap. Fig. 5 shows the dependences of the charge collection efficiency of the Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V-based detector on the content of deep donors with different energy levels relative to the top of the valence band. The vanadium concentration was taken to be equal to $5.5 \cdot 10^{15}$ cm⁻³, when resistivity reached the maximal value $\rho \ge 1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot cm$, and the content of the studied deep donors varied from $1 \cdot 10^{14}$ to $2 \cdot 10^{16}$ cm⁻³. For these donor levels the capture cross-section was set within $(1-3) \cdot 10^{-17}$ cm².

Fig. 5 shows that the most harmful donor impurities in $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te are those with the energy level located within $(E_V+0.9)-(E_V+1.2)$ eV in the band gap. Donors with $E_V+0.4$ eV, which is very close to the energy level of tellurium vacancies in CdTe and CdZnTe [21], reduce charge collection the least. Donor impurities with energy levels of 0.6–0.8 eV relative to the valence band make



Fig. 4. Dependence of the charge collection efficiency of the detector based on $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V on the content of the vanadium impurity for different concentrations V_{Cd}^{2-} , cm⁻³: $I = 4.1 \cdot 10^{14}$; $2 = 9 \cdot 10^{14}$; $3 = 4 \cdot 10^{15}$; $4 = 9 \cdot 10^{15}$; $5 = 2 \cdot 10^{16}$; $6 = 3 \cdot 10^{16}$; $7 = 5 \cdot 10^{16}$



1 - 0.4; 2 - 0.6; 3 - 0.8; 4 - 1.0; 5 - 1.2;6 - 1.4; 7 - 1.5 a certain contribution to reducing charge collection. T_{12} , T_{13} defects associated with the introduction of manganese and vanadium get to this range. And if at the calculations of η , in addition to the electronic component, we also take into account the hole one, then this value turns out to be even smaller by approximately 0.15 arbitrary units than the one shown in Fig. 5. Thus, the most harmful are impurities that correspond to Ni, Sn, Ge in Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te [20]. Vanadium is quite harmful in Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te [20], which, by the way, was added to Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V to compensate for cadmium vacancies. It is probably for this reason, the initial value of the charge collection efficiency in the initial state of the studied CMT is noticeably lower ($\eta \approx 0.55$) compared to the mentioned Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te ($\eta \approx 0.9$).

We should also take into account the results published in [22], where Cd_{0.95}Mn_{0.05}Te:In crystals with the resistivity $\rho = (1.0 - 2.5) \cdot 10^{10} \Omega \cdot cm$ were studied. Mn(99.9998%), Te(6N), CdTe (6N), and In(6N) were used as primary materials. Although the initial raw materials were high-clean, the obtained crystal had a relatively small value $\mu \cdot \tau = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$. The detector based on this material, despite being equipped by Frisch grid, registered the main photopeak of ¹³⁷Cs at the beam energy $E\gamma = 622$ keV with a rather coarse (compared to CdZnTe) energy resolution 7.5%. In another experiment [23], on the other hand, the amplitude gamma spectra of a flat Cd_{0.95}Mn_{0.05}Te_{0.98}Se_{0.02}:In-based detector irradiated with ²⁴¹Am had an even worse energy resolution — 11% at the beam energy of 59.5 keV. And after irradiation by ⁵⁷Co source, the authors of this paper recorded an amplitude spectrum with an even greater blurring of the main photopeak due to a decrease in η .

Thus, based on the results of these studies and our own research, it can be assumed that during the producing of Cd_{1_r}Mn_rTe, the introduced manganese not only forms a solid replacement solution, but also some its amount enters the interstitial positions with the formation of point defects and their complexes (associates), which leads to the emergence of deep energy levels acting as traps for nonequilibrium charge carriers. Impurities of vanadium and other elements that have an atomic radius equal to or smaller than that of Cd, Mn, and Te can also play an important role in such process. These electrically active defects, acting as traps, significantly reduce the charge collection efficiency of the detector, and lead to blurring of the main peaks in the amplitude spectra. If this assumption is correct, then it becomes clear why the significant efforts of technologists to purify the raw materials did not give the expected results. In this regard, it is worth focusing further research on elucidating the effect of various donor impurities on the appearance of deep energy levels in the band gap of crystals based on CdMnTe and CdTe and establishing the degree of their influence on the degradation of the detector properties of these materials.

Conclusions

The largest theoretically possible resistivity of $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V at the temperature of 20°C and the deep donor energy $E = E_V + 0.86$ eV can reach $3 \cdot 10^{11} \Omega \cdot cm$. Obtaining a detector-quality $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te material with $\rho \ge 10^{10} \,\Omega \cdot cm$ requires doping with a donor impurity with an energy level E_{DD} within the range of 0.94–0.74 eV relative to the top of the valence band. Change in the content of the donor impurity, which is introduced to compensate for cadmium vacancies, strongly affects ρ , and even its concentration of 10^{16} cm⁻³ can lead to a sharp degradation of the resistivity with a sudden change in the concentrations of electrons and holes. The charge collection efficiency, which is decisive for obtaining amplitude spectra with a high resolution of the main peaks, is noticeably lower in the Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te-based detector than in the detector based on $Cd_{0.9}Zn_{0.1}$ Te. At this stage of technological development, it may be caused not so much by the purity of the constituent components of the produced crystals, but by the nature of the elements that are intentionally introduced into the matrix in order to obtain high detector performance.

Further research should be directed at elucidating the effect of different donor impurities on the occurrence of energy levels inside the band-gap of CdMnTe-based crystals and other CdTe-based materials that fail to get at least as good detector properties as CdZnTe.

REFERENCES

1. Egarievwe S.U., Lukosi E.D., James R.B. et al. Advances in CdMnTe nuclear radiation detectors development. 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC), 2018, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/ NSSMIC.2018.8824694

2. Pengfei Yu,Yongren Chen,Wei Li et al. Study of detector-grade CdMnTe:In crystals obtained by a multi-step post-growth annealing method. *Crystals*, 2018, vol. 8, iss. 10, p. 387. https://doi.org/10.3390/cryst8100387

3. Lijun Luan, Li Gao, Haohao Lv et al. Analyses of crystal growth, optical, electrical, thermal and mechanical properties of an excellent detector-grade $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V crystal. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, iss. 1, pp. 2749-1–2749-10. https://doi.org/10.1038/s41598-020-59612-0

4. Mycielski A., Wardak A., Kochanowska D. et al. CdTe-based crystals with Mg, Se, or Mn as materials for X and gamma ray detectors: Selected physical properties. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, November 2021, vol. 67, iss. 4, p. 100543 https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2021.100543

5. Egarievwe S.U., Chan W., Kim K.H. et al. Carbon coating and defects in CdZnTe and CdMnTe nuclear detectors. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 2016, vol. 63, iss. 1, pp. 236–245. https://doi.org/10.1109/TNS.2016.2515108

6. Rejhon M., Dědič V., Beran L. et al. Investigation of deep levels in CdZnTeSe crystal and their effect on the internal electric field of CdZnTeSe gamma-ray detector. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 2019, vol. 66, iss. 8, pp. 1952–1958. https://doi.org/10.1109/ TNS.2019.2925311

7. McCoy J.J., Kakkireni S., Gélinas G. et al. Effects of excess Te on flux inclusion formation in the growth of cadmium zinc telluride when forced melt convection is applied. *Journal of Crystal Growth*, 2020, vol. 535, p. 125542. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.125542

FUNCTIONAL MICRO- AND NANOELECTRONICS

8. Roy U.N., Camarda G.S., Cui Y. et al. Growth of CdMnTe free of large Te inclusions using the vertical Bridgman technique. *Journal of Crystal Growth*, March 2019, vol. 509, pp. 35–39. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.12.026

9. Vigneshwara P. Raja. Deep-level defects in CdZnTe and CdMnTe detectors identified by photoinduced current transient spectroscopy (PICTS) and thermally simulated current (TSC) techniques. *Technical Report*, October 2020, Indian Institute of Technology Dharwad. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28738.45766

10. Kondrik O.I., Solopikhin D.O. Changes in the electrophysical and detector properties of the promising detector material $Cd_{1-x}Mn_x$ Te depending on the concentration of impurities, defects and manganese content. *Problems of Atomic Science and Technology, series Vacuum, Pure Materials, Superconductors*, Accepted for publication in no. 1, 2024.

11. Kim K. H., Bolotnikov A. E., Camarda G. S. et al. New approaches for making large-volume and uniform CdZnTe and CdMnTe detectors. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 2012, vol. 59, iss. 4, pp. 1510–1515. https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2202917

12. Kim K., Cho S., Suh J. et al. Gamma-ray response of semiinsulating CdMnTe crystals. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 2009, vol. 56, iss. 3, pp. 858–862. http://dx.doi.org/10.1109/ TNS.2009.2015662

13. Nykoniuk Ye., Solodin S., Zakharuk Z. et al. Compensated donors in semi-insulating $Cd_{1-x}Mn_x$ Te:In crystals. *Journal of Crystal Growth*, October 2018, vol. 500, pp. 117–121. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.08.013

14. Lijun Luan, Yi He, Dan Zheng et al. Defects, electronic properties, and α particle energy spectrum response of the $Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V$ single crystal. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, vol. 31, pp. 1179–4487. https://doi.org/10.1007/s10854-020-02996-6

15. Novikov G.F., Radychev N.A. Experimental determination of the dependence of the free electron-hole recombination rate constant on the band gap in semiconductors of the $A^{II}B^{VI}$ and $A^{I}B^{VII}$ types.

Russian Chemical Bulletin, 2007, vol. 56, pp. 890-894. https://doi. org/10.1007/s11172-007-0134-9

16. Shockley W., Read W.T. Statistics of the recombinations of holes and electrons. *Physical Reviev*, 1952, vol. 87, iss. 5, pp. 835–842. https://doi.org/10.1103/PhysRev.87.835

17. Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of impurities and structural defects on electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnT. *Technology and design in electronic equipment*, 2019, no. 5–6, pp. 43–50. https://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43 (Rus)

18. Knoll G. F. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons, Inc., 2010, 864 p.

19. Petrus R.Yu., Ilchuk H.A., Sklyarchuk V.M.et al. Transformation of band energy structure of solid solutions CdMnTe. *Journal of Nanoand Electronic Physics*, 2018, vol. 10, iss. 6, p. 06042. https://doi. org/10.21272/jnep.10(6).06042

20. Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of impurities and structural defects on the properties of CdTe- and CdZnTe-based detectors. *Technology and design in electronic equipment*, 2022, iss. 1–3, pp. 31–38. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.31 (Ukr)

21. Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $Cd_{1-x}Zn_xTe$. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1996, vol. 380, iss. 1–2, pp. 117–120. https://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2

22. Roy U.N., Okobiah O.K., Camarda G.S., et al. Growth and characterization of detector-grade CdMnTe by the vertical Bridgman technique. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, p. 105012. https://doi.org/10.1063/1.5040362

23. Byun J., Seo J., Seo J., Park B. Growth and characterization of detector-grade CdMnTeSe. *Nuclear Engineering and Technology*, November 2022, vol. 54, iss. 11, pp. 4215–4219 https://doi.org/10.1016/j.net.2022.06.007

Received 10.09 2023

DOI: 10.15222/ТКЕА2023.3-4.52 УДК 621.315.592.3

О. І. КОНДРИК, Д. О. СОЛОПІХІН

Україна, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ПЛИВ ВМІСТУ ДОМІШОК ТА СТРУКТУРНИХ ДЕФЕКТІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВІ Cd_{0 9}Mn_{0 1}Te:V

Досліджено перспективний матеріал $Cd_0.9Mn_{0.1}$ Te:V, призначений для працюючих за кімнатної температури детекторів рентгенівського та гамма-випромінювання. Отримано результати кількісних досліджень впливу вмісту домішок та структурних дефектів на електрофізичні та детекторні властивості $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V. Проведено аналіз обчислених величин питомого опору ρ та концентрацій вільних носіїв заряду, часу життя нерівноважних носіїв заряду τ , ефективності збирання зарядів η за різного складу домішок та дефектів у цьому матеріалі за температури 20°C. Встановлено оптимальні діапазони зміни енергії E_D та концентрації глибокого донора N_D , які забезпечують високоомний стан й прийнятні величини τ та η . Досліджено компенсацію вакансій кадмію домішкою ванадію. Зроблено припущення щодо причини відносно малої величини η та низької роздільності основних фотопіків в амплітудних спектрах детекторів на основі CdMnTe. Сформульовано напрямок подальших досліджень з метою з'ясування конкретних чинників деградації детекторних властивостё матеріалу під впливом внесених та фонових домішок.

Ключові слова: СdMnTe, властивості детектора, моделювання, дефекти структури, глибокі рівні.

Опис статті для цитування:

Кондрик О. І., Солопіхін Д. О. Вплив вмісту домішок та структурних дефектів на властивості детектора на основі Cd_{0.9}Mn_{0.1}Te:V. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4, с. 52–58. http://dx.doi.org/10.15222/ TKEA2023.3-4.52

Cite the article as:

Kondrik O. I., Solopikhin D. A. Influence of the content of impurities and structural defects on the properties of the $Cd_{0.9}Mn_{0.1}$ Te:V-based detector. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 52–58. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.52

УДК 538.9

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.59

Д. ф.-м. н. П. В. ГОРСЬКИЙ^{1, 2}

Україна, м. Чернівці, ¹Інститут термоелектрики НАН та МОН України, ²Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича Е-mail: gena.grim@gmail.com

ЧИ ДЕГРАДУЮТЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРНІ МОДУЛІ ВНАСЛІДОК ДИФУЗІЇ НІКЕЛЮ

3 використанням розробленої методики показано, що дифузія нікелю навіть протягом 50 років не веде до деградації термоелектричних генераторних модулів. Для розрахунку електричного контактного опору використано теорію композитів і запропоновану дифузійну теорію електричного контактного опору, а також методику апроксимації температурних залежностей характеристик термоелектричного матеріалу за експериментальними даними.

Ключові слова: термоелектричний генераторний модуль, контактний опір, дифузія нікелю, дифузійна теорія, теорія композитів.

Контактні структури у термоелектричних модулях "стандартних" розмірів з довжиною термоелектричної гілки 1,5-3 мм створюються шляхом паяння. З метою попередження дифузії компонентів припою у термоелектричний матеріал (ТЕМ), що, як вважасться, веде до небажаних змін характеристик ТЕМ, на поверхню гальванічним чи суто хімічним шляхом осаджується антидифузійний шар нікелю або кобальту, рідше — заліза або марганцю. Проте серед фахівців у сфері термоелектрики існують певні побоювання, що дифузія і цих матеріалів у ТЕМ призведе до небажаних змін його параметрів. Аби з'ясувати, чи це так, автори [1] експериментально дослідили транспортні властивості та термоелектричну ефективність сплаву Cu_{0 01}Bi₂Te_{2 7}Se_{0 3}, легованого нікелем, кобальтом, залізом і марганцем у кількості 2 ат.%. Було встановлено, що за концентрації домішки $(2.8-5.3) \cdot 10^{19}$ см⁻³ термоелектрична ефективність практично не залежить від неї у температурному інтервалі від 5 до 350 К, в інтервалі до 475 К домішка, наприклад, нікелю термоелектричну ефективність знижує, а вище — збільшує. Ґрунтуючись на аналізі отриманих даних, автори зробили висновок, що в дослідженому температурному інтервалі наявність матеріалу антидифузійного шару у ТЕМ не призводить до деградації модулів. Але тут важливо, що власне процес дифузії в роботі [1] не досліджувався, тому її результати не дають уявлення про те, як саме буде поводити себе ТЕМ, а отже, і термоелектричний генераторний модуль протягом тривалого часу, наприклад років або десятків років. Не дають відповідь на це питання й такі поглиблені експериментальні дослідження, як, наприклад, робота [2] та багато інших, де проводилося прискорене старіння контактних структур «нікель — телурид вісмуту» за підвищеної температури з метою дослідити їхню міцність, структуру, хімічний та фазовий склад продуктів, які утворюються в процесі старіння. Очевидно, що дослідити цю проблему суто експериментальними методами неможливо через значні витрати часу, їхню працемісткість та дороговартісність. При цьому слід зауважити, що окрему та доволі складну задачу являє собою вимірювання контактного опору, і в процесі описаних вище досліджень він не визначався.

У цій роботі стояла задача провести теоретичне дослідження процесу дифузії нікелю у системі «нікель — телурид вісмуту» і за його результатами запропонувати дифузійну теорію контактного опору та отримати його оцінку.

Розв'язання рівняння нестаціонарної дифузії металу у ТЕМ і наслідки з нього

Якщо коефіцієнт дифузії *D* металу у ТЕМ вважати сталим, то в одновимірному наближенні це рівняння матиме вигляд

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2},\tag{1}$$

де *с* — концентрація атомів металу;

- *t* час;
- *х* координата, відрахована від межі поділу углиб ТЕМ.

На перший погляд такий підхід може видатись надто спрощеним і необґрунтованим. І справді, у найзагальнішому випадку коефіцієнт дифузії залежить від концентрації домішки, а внаслідок закону Ареніуса — і від температури. Тому у найзагальнішому випадку реального функціонування термоелектричних гілок, термоелементів і модулів необхідно розв'язати спільно два сильно нелінійних нестаціонарних рівняння другого порядку у частинних похідних: відносно концентрації домішки і відносно температури. Аналітично це зробити неможливо.

МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Проте залежність коефіцієнта дифузії від концентрації домішки, як показано у досить давній праці [3], має місце лише для домішок з великою розчинністю. Для матеріалів на основі системи Bi(Sb) –Te(Se) такою домішкою є йод, але аж ніяк не нікель. Окрім того, з метою максимального спрощення задачі будемо розглядати процес дифузії нікелю в ізотермічних умовах, як це робиться при дослідженні процесів старіння контактних структур. Таке наближення використовувалося й при дослідженні процесів дифузії нікелю та олова у TEM на основі системи Bi(Sb) – Te(Se) [3]. Саме внаслідок цих наближень коефіцієнт дифузії, що реально залежить від температури та концентрації, будемо розглядати як сталий.

Тут слід зазначити, що в задачах, які потребують чисельного розв'язання, майже завжди виникає необхідність досягнення певного компромісу між повнотою й, отже, складністю фізичної моделі процесу або явища і можливістю обробити й описати її аналітичними та комп'ютерними методами з прийнятною точністю за прийнятний проміжок часу, а значить, і необхідність виділення визначальних рис та особливостей моделі.

Для випадку напівобмеженого середовища розв'язок рівняння (1) можна взяти у широко відомому вигляді [2, 3]:

$$c = c_0 \operatorname{erfc}\left(x/\sqrt{2Dt}\right),\tag{2}$$

де erfc(...) — так званий додатковий інтеграл помилок.

Розв'язок (2) задовольняє очевидній початковій умові c(t=0)=0 і очевидній граничній умові $c(x=0)=c_0$. У праці [4] на основі рівняння (2) і умови балансу кількості речовини було показано, що збільшення перехідного шару в цьому разі відбувається за законом $x_0 = 13,552\sqrt{Dt_0}$. Таким чином, товщині h витраченої частини шару нікелю відповідає товщина 6,771 $\sqrt{\pi}h \approx 12h$ перехідного контактного шару. Важливо, що це справедливо за будь-яких ізотермічних умов. Температура внаслідок закону Ареніуса впливає лише на час витрачання нікелю. При цьому розподіл концентрації атомів металу у перехідному шарі, нормований на його товщину (**рис. 1**), визначається формулою



Важливо зазначити, що в ізотермічних умовах співвідношення між товщиною перехідного контактного шару і товщиною шару витраченого нікелю є інваріантом дифузійного процесу, який визначає формування перехідного контактного шару. Значення коефіцієнту дифузії визначає лише часову залежність товщини перехідного контактного шару й, отже, контактного опору «TEM — метал».

Після вичерпання поверхневого шару нікелю його розподіл у ТЕМ в ізотермічних умовах описується співвідношенням

$$c(x,t) = \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \int_{0}^{12h} \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{\sqrt{\pi h}}\right) \exp\left[-\frac{(x-y)^2}{4Dt}\right] dy.$$
(4)

Розподіл нікелю у перехідному шарі для різних моментів часу у процесі тривалої дифузії після вичерпання перехідного шару зображено на **рис. 2**.

3 рис. 2 видно, що вирівнювання концентрації у термоелектричній гілці довжиною 1,5 мм за температури 300 К відбувається приблизно через 50 років після вичерпання вихідного шару нікелю. Слід зазначити, що коефіцієнти дифузії нікелю у матеріалах *p*- та *n*-типу відрізняються за порядками величин [3]. У розрахунках нами була прийнята більша з них, а саме 3,1·10⁻¹⁴ см²/с. З наведених рис. 2 даних та даних роботи [5, с. 55] випливає, що концентрація атомів нікелю у ТЕМ після вирівнювання складатиме 3,644·10¹⁹ см⁻³. Якщо припустити, що у вихідному ТЕМ за 300 К термоЕРС складає 160 мкВ/К, показник розсіювання r = -0.5, а ефективна маса вільних носіїв заряду $m^* = m_0$, то виходить, що концентрація носіїв у ньому дорівнює 3,47·10¹⁹ см⁻³. Таким чином, у ході вирівнювання концентрації нікелю відбувається своєрідне "легування", у результаті якого через 50 років концентрація носіїв заряду у ТЕМ збільшиться приблизно у 2,05 рази, якщо вважати, що кожен атом нікелю постачає у домішковий ТЕМ один вільний носій заряду того ж знаку. Якщо провести порівняння, хоча й не цілком коректне, з результатами праці [1], то можна зазначити, що там у випадку легування нікелем концентрація носіїв заряду збільшилась у 1,54 раза порівняно з вихідним ТЕМ.





МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Розрахунок температурних залежностей електричного контактного опору

Визначимо ці залежності, використовуючи теорію композитів і враховуючи явище перколяції, пов'язане з утворенням металевих кластерів у товщі перехідного шару. Для цього спочатку визначимо об'ємну частку нікелю у перехідному контактному шарі:

$$v(x) = \frac{(A_m/\rho_m)\operatorname{erfc}(6,771x)}{(A_m/\rho_m)\operatorname{erfc}(6,771x) + (M_s/\rho_s)\operatorname{erf}(6,771x)}, \quad (5)$$

де A_m , ρ_m — відповідно, атомна маса та густина металу;

 M_{s}, ρ_{s} — відповідно, молекулярна маса та густина ТЕМ.

Тепер координатна залежність питомої електропровідності перехідного контактного шару визначиться так:

$$\sigma(x) = 0,25 \left\{ 2\sigma_s - \sigma_m + 3\nu(x)(\sigma_m - \sigma_s) + \sqrt{\left[2\sigma_s - \sigma_m + 3\nu(x)(\sigma_m - \sigma_s) \right]^2 + 8\sigma_m \sigma_s} \right\}, \quad (6)$$

де σ_s, σ_m — провідності ТЕМ і металу за довільної температури T відповідно.

Отже, електричний контактний опір «ТЕМ — метал» за довільної температури *Т* можна визначити як

$$r_c(T) = 12h \int_0^1 \frac{dx}{\sigma(x)},\tag{7}$$

де *h* — товщина витраченого шару нікелю.

З приводу формул (6) і (7) зазначимо, що для неоднорідного розподілу металу у ТЕМ вони виводилися на основі теорії протікання у найпростішому наближенні Бругемана — Ландауера [6; 7, с. 787], яке природним чином пов'язане виключно з розмірністю розглядуваної системи і тому, на наш погляд, є найбільш зрозумілим. Існують і більш точні наближення, наприклад наближення Саричева — Виноградова [8], але вони містять "приховані" параметри, значення яких дуже часто невідомі.

Електропровідність металу будемо вважати обернено пропорційною до температури:

$$\sigma_m = \sigma_{m0}(T_0/T), \tag{8}$$

де
 σ_{m0} — відоме значення електропровідності металу за деякої температур
и T_0 .

Температурну залежність електропровідності ТЕМ знаходимо таким чином. Спочатку, знаючи його термоЕРС α_{s0} за тієї ж температури і враховуючи обумовлене вище значення показника розсіювання, зі співвідношення

$$\alpha_{s0} = \frac{k}{e} \left(\frac{2F_1(\eta_0)}{F_0(\eta_0)} - \eta_0 \right)$$
(9)

знаходимо зведений хімічний потенціал підсистеми вільних носіїв заряду за цієї температури. Далі, враховуючи умову сталості концентрації вільних носіїв заряду і нехтуючи температурною залежністю їхньої ефективної маси, з рівняння

$$\frac{T}{T_0} \int_{-\infty}^{1.5} \frac{F_{1/2}(\eta)}{F_{1/2}(\eta_0)} - 1 = 0,$$
(10)

де $F_m(y)$ — інтеграли Фермі, які визначаються співвідношенням

$$F_m(y) = \int_0^\infty \frac{dx}{\exp(x - y) + 1},$$
 (11)

знаходимо температурну залежність зведеного хімічного потенціалу η . Після цього, вважаючи константи матеріалу, якими визначається розсіювання носіїв заряду на деформаційному потенціалі акустичних фононів, незалежними від температури і знаючи питому електропровідність ТЕМ σ_{s0} за температури T_0 , знайдемо його питому електропровідність за довільної температури:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1.5} \frac{F_{1/2}(\eta_0) F_0(\eta)}{F_{1/2}(\eta) F_0(\eta_0)}.$$
(12)

Результати розрахунку температурних залежностей електричного контактного опору для пари «телурид вісмуту — нікель» наведено на **рис. 3**, *а*.

При побудові графіків було взято значення електропровідності нікелю і телуриду вісмуту за $T_0=300$ К: $\sigma_{m0}=1,43\cdot10^5$ См/см; $\sigma_{s0}=1,4\cdot10^3$ См/см, а також $A_m=58$; $\rho_m=9100$ кг/м³; $M_s=802$; $\rho_s=7860$ кг/ м³. З рисунка видно, що за товщини витраченого шару нікелю 5 мкм електричний контактний опір у розглянутому діапазоні температури змінюється від 2,5·10⁻⁶ до 8·10⁻⁶ Ом·см², а за товщини 20 мкм — від 10⁻⁵ до 3,2·10⁻⁵ Ом·см². Побудовані залежності є коректними,





оскільки за будь-яких ізотермічних умов співвідношення між товщиною витраченого шару нікелю і товщиною перехідного шару зберігається. Температура, через активацію дифузії, впливає лише на час витрачання нікелю. Традиційно антидифузійний шар робиться товщиною 20 мкм. Тому порівняння розрахованих значень електричного контактного опору з тими, які традиційно "призначаються" й використовуються при проєктуванні термоелектричних генераторів і охолоджувачів (найчастіше використовується, наприклад, середнє значення $5 \cdot 10^{-6}$ Ом см²), дозволяє зробити висновок, що товщина шару нікелю, який дифундує, не перевищує 5 мкм, а решта 15 мкм залишається на поверхні.

Теплопровідність перехідного контактного шару визначається як

$$\kappa(x) = 0.25 \left\{ 2\kappa_s - \kappa_m + 3\nu(x)(\kappa_m - \kappa_s) + \sqrt{\left[2\kappa_s - \kappa_m + 3\nu(x)(\kappa_m - \kappa_s)\right]^2 + 8\kappa_m \kappa_s} \right\}. (13)$$

Отже, його питомий тепловий контактний опір дорівнює

$$r_t(T) = 12h \int_0^1 \frac{dx}{\kappa(x)}.$$
 (14)

При цьому теплопровідність металу κ_m вважатимемо незалежною від температури, а теплопровідність ТЕМ κ_s знайдемо так:

$$\kappa_s = L\sigma_s T + (\kappa_{s0} - L_0\sigma_{s0}T_0)\frac{T_0}{T}.$$
(15)

Числа Лоренца у формулі (15) визначаються за формулами

$$L = \left(\frac{k}{e}\right)^{2} \left[\frac{3F_{2}(\eta)}{F_{0}(\eta)} - 4\frac{F_{1}(\eta)^{2}}{F_{0}(\eta)^{2}}\right];$$
(16)

$$L_0 = \left(\frac{k}{e}\right)^2 \left[\frac{3F_2(\eta_0)}{F_0(\eta_0)} - 4\frac{F_1(\eta_0)^2}{F_0(\eta_0)^2}\right].$$
 (17)

При виведенні формули (15) вважалось, що теплопровідність ТЕМ, зумовлена вільними носіями заряду, підпорядковується закону Відемана-Франца, а його ґраткова теплопровідність — закону Лейбфріда-Шлемана.

Температурні залежності питомого теплового контактного опору пари «нікель — телурид вісмуту» зображено на рис. 3, б. При побудові графіків було взято такі значення теплопровідності нікелю та ТЕМ за 300 К: κ_{m0} =0,92 Вт/(см·К); κ_{s0} =1,7·10⁻² Вт/ (см·К).

3 рис. 3, б видно, що у інтервалі температур 200–500 К питомий тепловий контактний опір перехідного шару за товщини витраченого шару нікелю 5 мкм змінюється в межах від 0,25 до 0,5 К · см²/Вт, а за товщини 20 мкм — від 1 до 2 К · см²/Вт. ТермоЕРС перехідного шару знаходимо так:

$$\alpha = \frac{\int_{0}^{1} \left[\alpha_{m} \kappa_{m}^{-1} \nu(x) + \alpha_{s} \kappa_{s}^{-1} (1 - \nu(x)) \right] dx}{\int_{0}^{1} \left[\kappa_{m}^{-1} \nu(x) + \kappa_{s}^{-1} (1 - \nu(x)) \right] dx},$$
(18)

де σ_m , σ_s — відповідно, термоЕРС металу та ТЕМ,

$$\alpha_s = \frac{k}{e} \left(\frac{2F_1(\eta)}{F_0(\eta)} - \eta \right).$$
(19)

На рис. 4 зображено температурні залежності термоЕРС, фактору потужності P та безрозмірної термоелектричної ефективності контактного шару ZT. Тут видно, що в інтервалі температури 200–500 К термоЕРС перехідного контактного шару зростає від 120 до 220 мкВ/К, фактор потужності має максимум за температури приблизно 320 К, який досягає 1,25·10⁻⁵ Вт/(м·K²), а безрозмірна термоелектрична ефективність зростає від 0,3 до 1,5. Таке зростання зумовлено тим, що перехідний контактний шар розглядається не як легований матеріал, а як композит,





компоненти якого, перебуваючи у його складі, зберігають свої термоелектричні характеристики включно з температурними залежностями. Ця особливість відрізняє композити від легованих термоелектричних матеріалів, в яких роль легувальних домішок полягає або у постачанні вільних носіїв заряду того чи іншого типу, або у зміні механізмів розсіювання фононів.

Зауважимо, що аналогічним чином за ізотермічних умов можна розглянути також вплив на контактний опір хімічних реакцій між нікелем і телуром, який, будучи компонентом термоелектричного матеріалу, здатен дифундувати у електролітичний нікель з утворенням телуриду нікелю NiTe₂ [9, с. 244]. Тоді після закінчення утворення NiTe₂ його можна розглядати як компонент, який дифундує у вихідний термоелектричний матеріал і утворює перехідний контактний шар. Але це не є предметом цього дослідження.

Як було показано вище, повне вирівнювання концентрації нікелю у гілці довжиною 1,5 мм навіть за найбільшого характерного для матеріалу *n*-типу коефіцієнта дифузії настає не раніше ніж через 50 років, та й ще за умови перебування всієї гілки за температури 500 К, чого не буває у реальних умовах роботи. При цьому рівноважна концентрація нікелю у термоелектричній гілці порівняна з концентрацією вільних носіїв заряду у вихідному ТЕМ. Розглянемо вплив такого своєрідного "легування" на безрозмірну термоелектричну ефективність ТЕМ.

Будемо вважати, що роль "легування" зводиться до постачання вільних носіїв заряду, причому кожним атомом нікелю постачається один носій. Спочатку знайдемо концентрацію вільних носіїв заряду у вихідному TEM:

$$n_0 = \frac{4(2\pi m^* k T_0)^{1.5} F_{1/2}(\eta_0)}{h^3 \sqrt{\pi}}.$$
 (20)

Вважаючи $m^* = m_0$ і враховуючи наведені вище результати, знайдемо, що $n_0 = 3,47 \cdot 10^{19}$ см⁻³, тобто відносне збільшення концентрації вільних носіїв заряду після вирівнювання складе $\delta = 1,05$.

Температурну залежність хімічного потенціалу підсистеми вільних носіїв заряду у "легованому" ТЕМ знайдемо з рівняння

$$\frac{F_{1/2}(\eta)T^{1,5}_{0}}{F_{1/2}(\eta_0)T^{1,5}_{0}(1+\delta)} - 1 = 0.$$
(21)

Питому електропровідність "легованого" ТЕМ знайдемо зі співвідношення

$$\sigma_s = \sigma_{s0} (1+\delta) \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1.5} \frac{F_{1/2}(\eta_0) F_0(\eta)}{F_{1/2}(\eta) F_0(\eta_0)}.$$
 (22)

Використовуючи співвідношення (15) — (17) та (19), знайдемо теплопровідність, термоЕРС та у підсумку — безрозмірну термоелектричну ефективність "легованого" матеріалу (**рис. 5**).



Рис. 5. Температурна залежність безрозмірної термоелектричної ефективності "легованого" ТЕМ

Виходячи з цієї залежності можна оцінити ККД термоелемента в двох режимах генерування електричної енергії:

— у режимі максимальної потужності

$$\eta_{\max P} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{1}{4/(Z_m T_h) + 2 - (T_h - T_c)/T_h},$$
 (23)

де Z_m — середнє значення термоелектричної добротності на інтервалі від T_c до T_h ;

у режимі максимального ККД

$$\eta_{\max} = \frac{(T_h - T_c) \left[\sqrt{1 + 0.5(ZT_h + ZT_c)} - 1 \right]}{T_h \left[\sqrt{1 + 0.5(ZT_h + ZT_c)} + T_c/T_h \right]},$$
 (24)

Відповідно до цих виразів отримано значення $\eta_{maxP} = 6,2\%$ та $\eta_{max} = 6,5\%$. Отже можна зробити висновок, що дифузія нікелю навіть протягом 50 років не впливає на роботу термоелемента. Знизити прогнозовані значення ККД може, зокрема, температурна залежність концентрації носіїв заряду та відмінна від закону Лейбфрида — Шлемана температурна залежність теплопровідності.

Висновки

Таким чином, на базі розробленої методики, що використовує теорію композитів і запропоновану дифузійну теорію електричного контактного опору, показано, що дифузія нікелю навіть протягом 50 років не веде до деградації термоелектричних генераторних модулів: після цього терміну в інтервалі температури від 200 до 500 К безрозмірна термоелектрична ефективність перехідного контактного шару змінюється від 0,18 до 1,03, що в діапазоні 300–500 К забезпечує ККД на рівні 6,2% в режимі максимальної потужності та 6,5% в режимі максимального ККД.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Lukas K.S., Liu W.S., Ren Z.F., Opeil L.P. Transport properties of Ni, Co, Fe, Mn doped Cu_{0.01}Bi₂Te_{2.7}Se_{0.3} for thermoelectric device applications. *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 112, pp. 054509-1 — 054509-5. http://dx.doi.org/10.1063/1.4749806

2. Lan Y.C., Wang D.Z., Chen G., Ren Z.F. Diffusion of nickel and tin in *p*-type (Bi,Sb)₂Te₃ and *n*-type Bi₂(Te,Se)₃ thermoelectric materials. *Appl. Phys. Let.*, 2008, vol. 92, iss. 10, 101910. https://doi. org/10.1063/1.2896310

МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОНІКИ

3. Федорович Н.А. Диффузия примесей в термоэлектрических материалах. Автореф. дисс. ... канд. физ.- мат. наук. Ленинград, 1965.

4. Gorskyi P.V. Diffusion theory of electrical contact resistance of the thermoelectric superlattice — metal couple. *arXiv* 2207.05065v1 [cond-mat.mes-hall]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.05065

5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М., Наука, 1978, 792 с.

6. Landauer R. The electrical resistance of binary metallic mixtures. J. Appl. Phys. 1952, vol. 23, iss. 7, pp. 779–784. https://doi.org/10.1063/1.1702301

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.59 UDC 538.9 7. Балагуров Б. Я. Электрофизические свойства композитов, М., Ленанд, 2015, 752 с.

8. Sarychev A.K, Vinogradov A.P, Effective medium theory for the magnetoconductivity tensor of disordered material. *Phys. Stat. Sol.* (*b*) 1983, vol. 117, iss. 2, pp. K113-K118. https://doi.org/10.1002/ pssb.2221170252

9. Чижиков Д. М., Счастливый В.П. *Теллур и теллуриды*. М., Наука, 1966, 280 с.

Дата надходження рукопису до редакції 06.07 2022 р. – 08.07 2023 р.

P. V. GORSKYI^{1,2}

Ukraine, Chernivtsi, ¹Institute of Thermoelectricity of NAS and MES of Ukraine,

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University E-mail: gena.grim@gmail.com

DO THERMOELECTRIC GENERATOR MODULES DEGRADE DUE TO NICKEL DIFFUSION

The author builds a strict diffusion theory of electrical contact resistance by studying the process of non-stationary diffusion of metal into the thermoelectric material, as a result of which a transition contact layer is formed. The distribution of metal atoms in the transition layer and the law of its growth are strictly determined from the condition of the balance of the substance quantity. It is shown that the relative distribution of nickel in the transition layer is described by a function erfc(6,771x), where erfc(...) is the so-called complementary error integral, and x is the normalized depth measured from the metal-thermoelectric material separation boundary. At the same time, the transition contact layer grows with time t according to the law $x_0 = 13,552(Dt)^{1/2}$, where D is the diffusion coefficient of the metal in the thermoelectric material, and its thickness is related to the thickness of the spent metal layer by the ratio $x_0 = 12h$, where h is the thickness of the spent nickel layer. Based on the obtained regularities, the temperature dependence of the first time. It is shown that for the thickness of the spent nickel layer in the range of $5-20 \mu$ m and in the temperature range of 300-500 K, the electrical contact resistance varies in the range from $3,8\cdot10^{-6}$ to $3,4\cdot10^{-5} \Omega \cdot cm^2$ and increases over time according to the square root law. It is also shown that there is no reason to fear a significant decrease in the thermoelectric figure of merit of the generator material as a result of nickel concentration leveling through the thickness of the thermoelectric leg after its surface layer is depleted.

Keywords: non-stationary diffusion, substance quantity balance, transition contact layer, electrical contact resistance, degradation, nickel concentration leveling.

REFERENCES

1. Lukas K.S., Liu W.S., Ren Z.F., Opeil L.P. Transport properties of Ni, Co, Fe, Mn doped Cu_{0,01}Bi₂Te_{2,7}Se_{0,3} for thermoelectric device applications. *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 112, pp. 054509-1—054509-5. http://dx.doi.org/10.1063/1.4749806

2. Lan Y.C., Wang D.Z., Chen G., Ren Z.F. Diffusion of nickel and tin in *p*-type (Bi,Sb)₂Te₃ and *n*-type Bi₂(Te,Se)₃ thermoelectric materials. *Appl. Phys. Let.*, 2008, vol. 92, iss. 10, 101910. https://doi. org/10.1063/1.2896310

3. Fedorovich N.A. *Diffuziya primesey v termoelektricheskikh materialakh. Avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Diffusion of impurities in thermoelectric materials. Author's abstract. diss. ... cand. Phys.-Math. Sci.]. Leningrad, 1965. (Rus)

4. Gorskyi P.V. Diffusion theory of electrical contact resistance of the thermoelectric superlattice — metal couple. *arXiv* 2207.05065v1 [cond-mat.mes-hall] https://doi.org/10.48550/ arXiv.2207.05065

5. Kittel' CH. *Vvedeniye v fiziku tverdogo tela* [Introduction to solid state physics]. M., Nauka, 1978, 792 p. (Rus)

6. Landauer R. The electrical resistance of binary metallic mixtures. *J. Appl. Phys.* 1952, vol. 23, iss. 7, pp. 779–784. https://doi. org/10.1063/1.1702301

7. Balagurov B. Ya. *Elektrofizicheskiye svoystva kompozitov* [Electrophysical properties of composites], M., Lenand, 2015, 752 c. (Rus)

8. Sarychev A.K, Vinogradov A.P, Effective medium theory for the magnetoconductivity tensor of disordered material. *Phys. Stat. Sol.* (*b*) 1983, vol. 117, iss. 2, pp. K113-K118. https://doi.org/10.1002/ pssb.2221170252

9. Chizhikov D. M., Schastlivyy V.P. *Tellur i telluridy* [Tellurium and tellurides]. M., Nauka, 1966, 280 p.

Опис статті для цитування:

Горський П. В. Чи деградують термоелектричні генераторні модулі внаслідок дифузії нікелю. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3-4, с. 59-64. http:// dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.59

Cite the article as:

Gorskyi P. V. Do thermoelectric generator modules degrade due to nickel diffusion. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 59–64. http://dx.doi.org/10.15222/ TKEA2023.3-4.59

УДК 536.248.2

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.65

Р. С. МЕЛЬНИК, Л. В. ЛІПНІЦЬКИЙ, д. т. н. Ю. Є. НІКОЛАЄНКО, д. т. н. В. Ю. КРАВЕЦЬ

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського E-mail: yunikola@ukr.net; m.roman.kpi@gmail.com

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПАРОУТВОРЕННЯ ТА ТЕПЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОЇ ПЛОСКОЇ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ З РІЗЬБОВИМ ВИПАРНИКОМ

Досліджувалися процеси випаровування та кипіння в тонкій плоскій гравітаційній тепловій трубі з різьбовим випарником в діапазоні теплових потоків від 5 до 55 Вт при різних кутах її нахилу до горизонту (0–90°). Основним завданням було візуальне виявлення закономірностей процесу пароутворення в умовах щілиноподібного парового каналу та подальше їх зіставлення з отриманими тепловими характеристиками. Показано взаємозв'язок між візуально виявленими особливостями протікання процесу пароутворення та тепловими характеристиками теплової труби — тепловим опором та середнім значенням температури в зоні нагріву.

Ключові слова: теплообмін, теплова труба, пароутворення, кипіння, тепловий опір.

Збільшення потужності електронних компонентів та питомих теплових потоків в комп'ютерних чипах до 2,0–4,5 МВт/м² з локальними гарячими точками (12–45 МВт/м²) [1] призводить до необхідності підвищення ефективності систем охолодження. Одним зі шляхів підвищення ефективності повітряних систем охолодження є використання в них теплових труб (**TT**) та термосифонів, теплопровідність яких на порядок перевищує теплопровідність міді [2–4], що дозволяє розосередити локальний тепловий потік на більшу поверхню теплообміну та знизити температуру електронних компонентів.

На сьогодні існують різноманітні конструкції теплових труб та термосифонів, які постійно поповнюються новими, проводяться дослідження з вивчення особливостей процесів теплообміну та гідродинаміки в них. З цією метою широко використовуються методи візуалізації внутрішніх процесів в теплових трубах. Так, в роботі [4] за допомогою ІЧ-візуалізації оцінювалась ефективність застосування термосифонів для повітряного охолодження підсилювачів потужності телекомунікаційного обладнання. Показано, що при потужності електронних компонентів 140 Вт застосування термосифона дозволило знизити загальний тепловий опір між основним підсилювачем потужності та навколишнім повітрям на 25%. В роботі [5] наводяться результати візуалізації процесів кипіння в скляному термосифоні з внутрішнім діаметром 20 мм з локальним джерелом підведення теплоти. Робоча рідина — вода. В результаті досліджень визначено основні закономірності протікання процесів залежно від висоти стовпа рідини над джере-

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України (проєкт № 2020.02/0357).

лом теплоти, картину градієнта тиску під час зародження, формування та відриву парових бульбашок. Автори [6] отримали картину протікання процесів кипіння фреону R134а та води в петлевому термосифоні. Через відносно великі розміри парового простору та коефіцієнту заповнення отримані візуальні зображення процесів кипіння мало відрізняються від попереднього дослідження для малих значень теплового потоку. В роботі [7] наводяться результати візуальних досліджень плоского багатоканального термосифона довжиною 144 мм з прямокутними каналами з поперечним перерізом 2×2 мм з різними робочими рідинами (етанол, ацетон, фреон R141b). Зміна коефіцієнта заповнення в широкому діапазоні (від 11,8 до 66%) дозволила спостерігати особливості процесів кипіння та знаходити між ними відмінності, зазначені у висновках роботи. Автори [8, 9] візуально спостерігали процеси активного кипіння та конденсації на мідних поверхнях, спеціальною обробкою яких досягались різні параметри змочування робочими рідинами (ацетон, етанол). Як і в попередніх роботах, тут наводиться розкадрування швидкісного фільмування. В роботі [10] відображено гідродинамічні процеси в термосифоні з внутрішнім діаметром 25 мм при куті нахилу до горизонту 10°. Наведено кількісну характеристику впливу орієнтації в просторі на тепловий опір експериментального зразка в широкому діапазоні значень коефіцієнтів заповнення. Автори [11] представляють картини кипіння, отримані для низки теплоносіїв (вода, ацетон, HFE7100) в умовах вертикальної орієнтації термосифона. Встановлено, що візуально процес активного пароутворення схожий до наведеного у [8].

Аналіз представлених в літературі робіт вказує на те, що більшість з них висвітлює питання процесів

пароутворення в двофазних системах з відносно великим діаметром парового простору та в умовах відносно довгої зони нагріву, яка дозволяє формуватися паровим снарядам. Разом з тим, у низці практичних застосувань ефективним було б використання тонких плоских гравітаційних теплових труб (**ГРТТ**) з різьбовою капілярною структурою [12, 13] з короткою зоною нагріву.

Метою цієї роботи було проведення експериментальних досліджень, які дозволяють візуально спостерігати процеси пароутворення у тонкій плоскій ГРТТ з різьбовою капілярною структурою в умовах щілиноподібного парового каналу з відносно короткою зоною випаровування і невеликою кількістю робочої рідини. Одночасно з візуальним спостереженням процесів пароутворення вивчався і вплив теплового навантаження та кута нахилу на основні теплові характеристики ГРТТ — тепловий опір та температуру в зоні нагріву.

Експериментальна установка та конструкція експериментального зразка ГРТТ

Для досягнення поставленої мети було створено експериментальну установку (**рис. 1**), яка дозволяла спостерігати за процесами пароутворення в ГРТТ при різній орієнтації в просторі та визначати її теплові характеристики.

Основним елементом робочої ділянки є експериментальний зразок тонкої плоскої ГРТТ з різьбовою капілярною структурою в зоні випаровування (**рис. 2**), тобто з різьбовим випарником. Експериментальний зразок ГРТТ являє собою мідну трубку прямокутного поперечного перерізу розмірами 15,5×4,0 мм довжиною 245 мм, виготовлену шляхом пресування циліндричної заготовки діаметром 12 мм з товщиною стінки 1 мм. У циліндричній заготовці на довжині 30 мм з одного кінця по-



Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки: 1 — джерело світла; 2 — швидкісна камера; 3 — поворотний пристрій; 4 — експериментальний зразок ГРТТ з радіатором; 5 — голковий вентиль; 6 — ватметр; 7 — персональний комп'ютер; 8 — лабораторний автотрансформатор; 9 — вакуумний насос; 10 — модуль збору даних



Рис. 2. Зовнішній вигляд експериментального зразка плоскої ГРТТ до установки прозорої скляної вставки (*a*) та різьбової капілярної структури в зоні випаровування у збільшеному масштабі (б)

передньо було нарізано внутрішню метричну різьбу М11 з дрібним кроком 0,5 мм. У верхній основі спресованої труби прямокутного поперечного перерізу шляхом фрезерування було виконано прямокутний паз розмірами $9,5 \times 240$ мм (рис. 2, *a*). З протилежної до різьбової частини сторони було впаяно клапан Шредера з капілярною трубкою, яка запобігала накопиченню робочої рідини в об'ємі клапана. За процесами пароутворення спостерігали через оглядове скло, герметично приєднане до корпусу за допомогою силіконового герметика. Робочою рідиною було обрано 96%-й розчин етилового спирту.

Імітатор теплового потоку довжиною 40 мм монтували на корпус ГРТТ через теплопровідну графітову прокладку. Зона нагріву (**3H**) була теплоізольована для зменшення втрат теплоти. Теплота відводилася радіатором розмірами 200×42×26 мм з п'ятьма ребрами охолодження висотою 20 мм, виконаних з кроком 10 мм на основі товщиною 6 мм. Товщина ребра біля основи — 2,4 мм, на вершині — 1,2 мм. Відведення теплоти від радіатора відбувалось вимушеною конвекцією навколишнього повітря за допомогою двох вентиляторів типу Gembird D40SM-12A. При цьому скляна вставка охолоджувалась вільною конвекцією навколишнього повітря.

Дослідження проводились для різних положень ГРТТ — від горизонтального до вертикального, а саме при кутах нахилу до горизонту 0°, 15°, 30°, 60° та 90°. Ці значення обирались з огляду на практичне застосування в системах охолодження електроніки. Зазначимо, що кут нахилу ГРТТ до горизонту визначався як кут нахилу до горизонту її грані розміром 15,5×245,0 мм (площини ГРТТ).

Методика проведення досліджень з отриманням візуальних даних

Перед початком кожної серії дослідів експериментальний зразок ГРТТ встановлювався та фіксувався під певним кутом нахилу за допомогою поворотного механізму 3 (див. рис. 1). За допомогою вакуумного насоса 9 типу ITE MK-50-DS видалявся несконден-

a)

б)

в)

г)

сований газ. Вмикалась система збору та передачі даних на основі персонального комп'ютера 7 зі спеціалізованим програмним забезпеченням та модуля збору даних 10 типу ICP CON M-7018-16. До модуля збору даних було під'єднано десять мідь-константанових термопар (Т-типу), шість з яких вимірювали температуру в зонах випаровування, конденсації та транспорту, по дві в кожній зоні.

Вмикались вентилятори та імітатор теплового потоку. Тепловий потяк підводили та контролювали за допомогою лабораторного автотрансформатора 8 типу ЛАТР 2.5-И та ватметра 6 типу Д5016. Фільмування починалось після встановлення стаціонарного теплового режиму роботи на певному значенні теплової потужності. При цьому джерело світла *1* спрямовувалось на робочу область експериментального зразка ГРТТ 4. За допомогою швидкісної камери 2 знімались гідродинамічні процеси при пароутворенні в зоні випаровування зі швидкістю знімання 240 кадрів на секунду.

Така відеофіксація процесу пароутворення проводилася для фіксованих значень теплового потоку в діапазоні від 5 до 55 Вт, які охоплювали два режими роботи ГРТТ: режим випаровування та режим кипіння. Максимальне значення теплового потоку в 3H обмежувалося температурними умовами надійної роботи макета без його розгерметизації під дією внутрішнього тиску. Максимальним значенням температури в зоні нагріву було обрано 80°С, що відповідає тиску насиченої пари етилового спирту 1,086 бар.

Перед кожною наступною серією досліджень експериментальний зразок ГРТТ охолоджувався, встановлювався в нове положення, після чого всі наведені вище дії повторювались. Зазначимо, що при зміні орієнтації ГРТТ позиція швидкісної камери налаштовувалась таким чином, щоб площини об'єктива та оглядового скла зразка були паралельні між собою.

В результаті обробки отриманих відеофайлів були створені картини протікання процесів пароутворення в зоні випаровування.

Результати досліджень експериментального зразка ГРТТ

Динаміка процесів пароутворення у ГРТТ в умовах її фіксованого положення у просторі та зміні теплового потоку

На **рис. 3** показано, як змінюється характер процесів пароутворення у ГРТТ при збільшенні теплового потоку Q в зоні нагріву від 20 до 45 Вт в умовах вертикальної орієнтації теплової труби в просторі. Зображення процесів для Q < 20 Вт тут не наводяться, оскільки за таких умов ГРТТ функціонує в режимі випаровування.

При Q=20 Вт (рис. 3, *a*) спостерігається активація поодинокого центру пароутворення, що призводить до вибухоподібного кипіння, спричиненого пе-







а — 20; б — 25; в — 35; г — 45

регрітою рідиною в примежовому шарі, яке характеризується швидким зростанням та відривом парової бульбашки. За такого режиму функціонування велика частина теплоносія виноситься далеко за межі зони нагріву. Збільшення потужності до 25 Вт призводить до активації додаткових центрів пароутворення (рис. 3, б), внаслідок цього робоча рідина виноситься з різною швидкістю за межі ЗН частинами, що призводить до утворення складної хаотичної гідродинамічної картини процесу. Це явище призводить до зменшення довжини, на яку виноситься робоча рідина за межі ЗН. З іншого боку, в таких умовах починає створюватись певна зона постійного знаходження робочої рідини поза ЗН. Формування такої зони стає більш очевидним при підвищенні теплового потоку до 35 Вт (рис. 3, в), коли спостерігається процес активного пароутворення із залученням великої кількості центрів пароутворення. Частина теплоносія постійно знаходиться за межами ЗН. Візуально спостерігається певне ядро паро-рідинної суміші, що рухається коливально (обведено пунктиром). Такий рух обумовлюється нерівномірною генерацією пари в часі та неоднаковістю формування паро-рідинного фронту. Також слід зауважити, що ядро не складається лише з теплоносія в рідкій фазі, а являє собою паро-рідинну суміш складної хаотичної форми, що змінюється з часом.

Підвищення теплового потоку до 45 Вт (рис. 3, *г*) виводить систему із описаної рівноваги, й розпочинається процес, візуально наближений до зображеного на рис. 3, *а*. Проте у цьому випадку винесення робочої рідини обумовлюється не поодинокими паровими бульбашками, що утворюються при майже одночасній активації центрів пароутворення, а їх скупченнями, які виникають при активації великої кількості близько розташованих центрів пароутворення.

Збільшення теплової потужності до 55 Вт в загальному випадку картину процесу не змінює, спостерігається лише більша його інтенсивність, а подальше підвищення теплової потужності унеможливлюється температурним обмеженням функціонування експериментального зразка ГРТТ.

Динаміка процесів пароутворення у ГРТТ в умовах фіксованого значення теплового потоку в зоні нагріву та зміні її кута нахилу

Розглянемо вплив орієнтації ГРТТ в просторі на протікання процесів пароутворення в зоні випаровування.

Перехід від режиму випаровування до режиму малорозвиненого кипіння досліджувався за різної орієнтації ГРТТ в просторі при фіксованій величині підведеного теплового потоку 20 Вт. Картина процесів при кутах нахилу 60° та 30° (**рис. 4**) аналогічна тій, що спостерігалась при вертикальному положенні, а саме — при активації поодиноких центрів пароутворення із зони нагріву паровими бульбашками вино-



Рис. 4. Моменти процесу пароутворення у ГРТТ, представлені з часовим кроком 8 мс, при Q = 20 Вт для різних значень кута нахилу: $a - 60^{\circ}$: $\delta - 30^{\circ}$: $\epsilon - 15^{\circ}$



Рис. 5. Схематичне зображення процесу кипіння в умовах малого кута нахилу ГРТТ

(напрямок руху пари показано стрілкою, а межі ЗН — пунктирною лінією)

ситься велика кількість робочої рідини (інколи навіть до повного осушення) з подальшим поверненням рідини до ЗН під дією сили гравітації. Зменшення кута нахилу призводило до збільшення часу повернення рідини до ЗН. Спостерігався також процес кипіння з тонких плівок після викидання основної маси робочої рідини за межі зони нагріву.

Особливий характер має картина кипіння при куті нахилу 15° (рис. 4, e), коли при активації поодиноких центрів пароутворення майже не відбувається вибухового кипіння, а робоча рідина не виноситься з зони нагріву. Очевидно, це відбувається через те, що при малому куті нахилу парова бульбашка майже одразу потрапляє через тонку плівку рідини у паровий простір, після чого потік пари практично без перешкод рухається до зони конденсації. Схематичне зображення цього процесу показано на **рис. 5**.

При підвищенні величини теплового потоку до 30 Вт активізуються додаткові центри пароутворення, що призводить до зміни візуальної картини. Як і при вертикальному положенні, при куті нахилу 60° (**рис.** 6, *a*) також відбувається утворення області поза зоною нагріву, в якій постійно знаходиться частина робочої рідини. В умовах більш пологого розташування ГРТТ (рис. 6, *б*, *в*) спостерігається часткове винесення парою теплоносія у рідкому стані. Особливістю процесу кипіння при куті нахилу 15° є постійне знаходження суттєвої частини робочої рідини поза межами зони нагріву.

Подальше збільшення підведеного теплового потоку до 40–50 Вт мало змінює картину процесів окрім їхньої інтенсивності.

Також спостерігали за особливостями процесів пароутворення при горизонтальному положенні ГРТТ. На **рис. 7** наведено результати візуалізації лише для значень теплового потоку 5 та 10 Вт, оскільки конфігурація ГРТТ та коефіцієнт заповнення не дозволили передати більший тепловий потік. За такої геометрії корпусу в горизонтальному положенні ГРТТ робоча рідина рівномірно розподілюється вздовж всієї



гис. 6. моменти процесу пароутворення у г г г г, представлені з часовим кроком 17 мс, при Q = 30 Вт для різних значень кута нахилу: $a - 60^\circ; \delta - 30^\circ; s - 15^\circ$



Рис. 7. Візуалізація особливостей процесу пароутворення при горизонтальному положенні площини ГРТТ (а) та бічному горизонтальному положенні ГРТТ (б)

ISSN 2225-5818 (Print) ISSN 2309-9992 (Online)

нижньої площини. На рис. 7, *а* видно зміну відтінку різьбової частини випарника, яка відбувається при збільшенні потужності підведеного теплового потоку від 5 до 10 Вт. Таким чином, можна зазначити, що в горизонтальному положенні ГРТТ при потужності 10 Вт відбувається осушення зони нагріву попри наявність різьбової структури. При цьому значна частина робочої рідини у вигляді крапель конденсату знаходиться на оглядовому склі. Крім осушення зони нагріву також спостерігається зміщення фронту конденсату далі від зони нагріву.

Для візуальної перевірки ефективності різьбової капілярної структури було проведено спеціальне дослідження при горизонтальній орієнтації експериментального зразка, повернутого на бік, тобто на грань розміром 4×245 мм (рис. 7, б), тоді площина ГРТТ розташовувалася перпенликулярно до поверхні землі. При цьому збільшувався рівень теплоносія в нижній частині ГРТТ, що дозволяло більш активно живити зону випаровування робочою рідиною. У цьому випадку осушення зони випаровування відбувалось при більшому значенні теплового потоку, а саме при 15 Вт. Крім цього було виявлено особливий характер осушення різьбової капілярної структури, яке відбувалось не зверху вниз, а від початку зони випаровування (на рисунку — зліва направо), що може свідчити про ефективність функціонування різьбової капілярної структури з точки зору капілярного живлення.

Теплові характеристики ГРТТ з різьбовою капілярною структурою

Розглянемо результати досліджень теплових характеристик ГРТТ — теплового опору та середнього значення температури в зоні нагріву, які проводились одночасно з візуальним спостереженням гідродинаміки процесів пароутворення.

На **рис. 8**, де наведено залежності теплового опору R досліджуваної ГРТТ від підведеного теплового потоку, видно, що для всіх значень кута нахилу теплової труби при збільшенні Q від 15 до 20 Вт різко падає R, як це відбувається при переході від режиму випаровування до режиму кипіння. Ці результати збігаються з візуальними спостереженнями: як зазначалось вище, саме при Q=20 Вт розпочинався процес активації поодиноких центрів пароутворення з вибухоподібним кипінням. Тобто рисунок можна умовно розділити на дві області, які відповідають основним режимам функціонування двофазної системи — випаровування (5–15 Вт) та активного кипіння (20–55 Вт).

Як видно з рис. 8, за вертикальної орієнтації ГРТТ у випарному режимі функціонування тепловий опір на 25-30% вищий, ніж за інших кутів нахилу, оскільки у цьому випадку площа поверхні випаровування є найменшою. Слід зауважити, що зміна орієнтації в діапазоні кутів нахилу 60-0° майже не впливає на теплові характеристики ГРТТ у випарному режимі, вочевидь, через обмежену здатність процесу випаровування з поверхні віддавати теплоту. На користь цього також свідчить той факт, що при горизонтальній орієнтації, тобто в умовах максимальної площі пароутворення, тепловий опір майже такий самий, як і при кутах нахилу 15° та 30°. Тобто, можна говорити про певне обмеження теплопередавальних характеристик ГРТТ типом процесу пароутворення. Таким чином, розробка систем, в яких можливий процес активного кипіння при малих значеннях теплових потоків, є перспективним завданням, бо це дозволить зменшити ймовірність відмов апаратури в умовах так званого холодного старту.

На рис. 9, де у збільшеному масштабі показано діапазон значень теплового опору ГРТТ в режимі активного кипіння, видно, що найнижчі значення теплового опору для теплових потоків від 20 до 55 Вт були отримані при куті нахилу 60°. Зменшення кута нахилу призводить до незначного погіршення функціонування ГРТТ, а саме зростання теплового опору в межах 5–13% залежно від величини Q. З іншого боку, зі збільшенням теплового потоку тепловий опір ГРТТ все менше залежить від її орієнтації в просторі: при Q=20 Вт тепловий опір для кута нахилу 60° (мінімальне значення) був на 13% нижчий, ніж для кута 15°, а при Q=50 Вт ця різниця зменшилася до 9%.


Мінімальне значення теплового опору при куті нахилу 60° досягається завдяки декільком факторам. По-перше, інтенсивність тепловіддачі при кипінні залежить не лише від кількості центрів пароутворення, а й від умов формування та відриву парових бульбашок. Інтенсивність тепловіддачі при кипінні в тонких плівках рідини є вищою, ніж при кипінні у великому об'ємі, тому при зменшенні кута нахилу ГРТТ вона збільшується через спрощення умов формування тонких плівок теплоносія на робочих поверхнях, яке відбувається завдяки зменшенню швидкості повернення теплоносія із зони охолодження. З іншого боку, зменшення швидкості повернення робочої рідини до зони нагріву призводить до зростання товщини плівки конденсату в зоні охолодження, через що знижується інтенсивність процесу конденсації. Слід зазначити, що в цьому дослідженні не розглядався процес конденсації по всій поверхні зони конденсації, а тільки на нижній та бокових поверхнях, що обумовлено конструкцією експериментального зразка. Тобто, це дослідження слід розглядати як окремий випадок функціонування двофазних систем в умовах, коли підведення та відведення теплового потоку відбувається з нижньої та частково бічних стінок ГРТТ. Крім того, брак теплоносія в зоні нагріву може призводити до локальних осушень і, як наслідок, до зростання теплового опору.

Якщо ж збільшувати кут нахилу, то картина буде дещо іншою. Інтенсивність конденсації зростатиме через зменшення товщини плівки конденсату. Щодо коефіцієнтів тепловіддачі в зоні випаровування, то вони будуть зменшуватись через описані вище причини.

Розглянемо залежності середнього значення температури в зоні нагріву T_{3H} від величини теплового навантаження, наведені для різних кутів нахилу ГРТТ на **рис. 10**. В діапазоні теплового потоку від 5 до 15 Вт включно, що відповідає випарному режиму роботи ГРТТ, спостерігається залежність T_{3H} від орієнтації труби у просторі. За мінімального значення теплового потоку 5 Вт максимальна різниця між T_{3H}



становить $\Delta T_{3H} = 11\%$ (найвище значення T_{3H} — при 90°, найнижче — при 15° та 30°). Ця різниця досить легко пояснюється зростанням площі випаровування при зміні орієнтації ГРТТ в просторі, як це було описано вище. Підвищення теплового потоку до 15 Вт змінює картину процесу випаровування тільки кількісно, а зростання ΔT_{3H} до 20% опосередковано вказує на різницю в інтенсивності тепловіддачі в процесі пароутворення.

В діапазоні теплових потоків від 20 до 55 Вт, що відповідає режиму кипіння, орієнтація ГРТТ в просторі суттєво не впливає на величину T_{3H} . Максимальне значення T_{3H} спостерігалось за потужності 55 Вт і становило менше 70°С. Найбільша різниця між значеннями температури при різній орієнтації в просторі не перевищує 4%, що спостерігається при Q=20 Вт. При збільшенні потужності, що призводить до активації процесу кипіння, така різниця зменшується до 2%. Тобто, в умовах активного функціонування експериментального зразка ГРТТ (в режимі кипіння) середні значення температури в зоні нагріву майже не залежать від її орієнтації в просторі в межах умов проведення експериментального дослідження.

Висновки

Таким чином, проведені дослідження показали, що підвищення ефективності функціонування двофазних систем теплопередачі є комплексною задачею, де необхідно одночасно враховувати декілька факторів. У цьому випадку можна говорити, що технічні рішення, спрямовані на збільшення ефективності теплопередачі в одній із секцій ГРТТ, можуть призвести до погіршення в іншій, внаслідок чого за певного збігу низки параметрів (значень кута нахилу та теплового потоку) ефективність не зміниться чи навіть може погіршитись. Так, наявність різьбової капілярної структури в секції випаровування ГРТТ не впливає на процеси теплообміну в зоні конденсації та гідродинаміку повернення теплоносія в зону нагріву, але порівняно з класичним термосифоном з гладким випарником підвищує ефективність випаровування завляки збільшенню центрів пароутворення. Підсумовуючи всі вищенаведені спостереження, можна стверджувати, що найбільша ефективність плоскої ГРТТ з різьбовою капілярною структурою з точки зору теплового опору досягається при куті нахилу 60°. Щодо температури в зоні нагріву, то за фіксованого теплового потоку її значення було мінімальним для кутів нахилу 15° та 30° незалежно від режиму функціонування ГРТТ.

Крім того, хочемо звернути увагу на те, що при оптимізації конструкції ГРТТ з різьбовою капілярною структурою в напрямку збільшення ефективності повернення теплоносія можна враховувати збільшення граничних теплових потоків, які вона може перенести, в горизонтальному бічному положенні.

Отримані результати можуть бути корисними при виборі режимних параметрів тонких плоских ГРТТ з різьбовою капілярною структурою для різних систем охолодження електронної апаратури на їх основі.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Karayiannis T. G., Mahmoud M. M. Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications. Applied Thermal Engineering, 2017, vol. 115, pp. 1372–1397. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.063.

2. Shu S., Hou G., Wang L. et al. Heat dissipation in highpower semiconductor lasers with heat pipe cooling system. *Journal* of Mechanical Science and Technology, 2017, vol. 31, iss. 6, pp. 2607–2612. DOI 10.1007/s12206-017-0502-9.

3. Хайрнасов С. М. Применение тепловых труб в системах обеспечения тепловых режимов РЭА: современное состояние и перспективы. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2015, № 2–3, с. 19–33. https://doi.org/10.15222/ TKEA2015.2-3.19

4. Siedel S., Robinson A. J., Kempers R., Kerslake S. Development of a naturally aspired thermosyphon for power amplifier cooling. *J. Phys. Conf.* Ser. 525, 2014, article 012007. https://doi.org/10.1088/1742-6596/525/1/012007

5. Londoño Pabón N. Y., Florez Mera J. P., Serafin Couto Vieira G., Barbosa Henriques Mantelli M. Visualization and experimental analysis of Geyser boiling phenomena in two-phase thermosyphons. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 141, pp. 876–890. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.052

6. Kloczko S., Faghri A. Experimental investigation on loop thermosyphon thermal performance with flow visualization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 150, article 119312. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119312

7. Yu W., Gao D., Wang G. et al. A visualization study on flat plate heat pipe (FPHP). *Proceedings of the Institution of Mechanical*

Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2012, vol. 235, iss. 7, pp. 1759–1769. https://doi.org/10.1177/0957650921990221

8. Seo D., Shim J., Shin D. H. et al. Dropwise condensation of acetone and ethanol for a high-performance lubricant-impregnated thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 181, article 121871. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121871.

9. Seo D., Park J., Shim J. et al. Effects and limitations of superhydrophobic surfaces on the heat transfer performance of a two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 176, article 121446. https://doi.org/10.1016/j. ijheatmasstransfer.2021.121446.

10. Kim Y., Shin D. H., Kim J. S. et al. Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosyphon with various filling ratios. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 145, pp. 328–342. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.037

11. Kim J. S., Kim Y., Shin D. H. et al. Heat transfer and flow visualization of a two-phase closed thermosiphon using water, acetone, and HFE7100. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 187, article 116571. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116571.

12. Nikolaenko Yu. E., Pekur D. V., Kravets V. Yu. et al. Study on the performance of the low-cost cooling system for transmit/ receive module and broadening the exploitative capabilities of the system using gravity heat pipes. *ASME. Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2022, vol. 14, iss. 12, article 121001. https://doi.org/10.1115/1.4054812

13. Nikolaenko Yu. E., Pis'mennyi E. N., Pekur D. V. et al. The efficiency of using simple heat pipes with a relatively low thermal conductivity for cooling transmit/receive modules. *Applied Thermal Engineering*, 2023, article 121512. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121512

Дата надходження рукопису до редакції 24.09 2023 р.

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.65 UDC 536.248.2 R. S. MELNYK, L. V. LIPNITSKYI, Yu. E. NIKOLAENKO, V. Yu. KRAVETS

Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" E-mail: yunikola@ukr.net; m.roman.kpi@gmail.com

VISUALIZATION OF VAPORIZATION PROCESSES AND THERMAL CHARACTERISTICS OF A THIN FLAT GRAVITY HEAT PIPE WITH A THREADED EVAPORATOR

The paper presents research on the visualization of boiling processes in a flat gravitational heat pipe within a range of thermal fluxes from 5 to 55 W. The main objective of the study is to identify visual patterns during boiling and correlate them with thermal characteristics obtained during research conducted with visual observations. Due to the high-speed nature of the processes, observations were made using a high-speed camera. Temperature values on the heat pipe's surface were also recorded using thermocouples and measurement systems. To obtain a comprehensive picture of the study, experiments were conducted at various inclination angles of the experimental heat pipe sample to the horizon, ranging from 0° to 90°. Visual schemes of boiling and evaporation were obtained and explained simultaneously with thermal performance of experimental sample. The study allowed discovering that, in terms of thermal resistance, 60° is the optimal inclination angle. On the other hand, the lowest evaporator temperature was obtained for 15° and 30° angles. Additionally, it was observed that the experimental sample is able to operate when positioned horizontally. Maximal transferred heat fluxes were extremely low compared to other angles. Nevertheless, even at horizontal orientation, thermal resistance was lower than for vertical position.

Key words: heat transfer, heat pipe, boiling, vapor generation, thermal resistance.

REFERENCES

1. Karayiannis T. G., Mahmoud M. M. Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications. Applied Thermal Engineering, 2017, vol. 115, pp. 1372–1397. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.063.

2. Shu S., Hou G., Wang L. et al. Heat dissipation in highpower semiconductor lasers with heat pipe cooling system. *Journal* of Mechanical Science and Technology, 2017, vol. 31, iss. 6, pp. 2607–2612. DOI 10.1007/s12206-017-0502-9.

3. Khairnasov S. M.The use of heat pipes in thermal control system for electronics: current situation and prospects. *Technology and design in electronic equipment*, 2015, no. 2–3, pp. 19–33. https://doi.org/10.15222/TKEA2015.2-3.19 (Rus)

4. Siedel S., Robinson A. J., Kempers R., Kerslake S. Development of a naturally aspired thermosyphon for power amplifier cooling. *J. Phys. Conf.* Ser. 525, 2014, article 012007. https://doi. org/10.1088/1742-6596/525/1/012007

5. Londoño Pabón N. Y., Florez Mera J. P., Serafin Couto Vieira G., Barbosa Henriques Mantelli M. Visualization and experimental analysis of Geyser boiling phenomena in two-phase thermosyphons. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 141, pp. 876–890. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.052

6. Kloczko S., Faghri A. Experimental investigation on loop thermosyphon thermal performance with flow visualization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 150, article 119312. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119312

7. Yu W., Gao D., Wang G. et al. A visualization study on flat plate heat pipe (FPHP). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Part A: Journal of Power and Energy, 2012, vol. 235, iss. 7, pp. 1759–1769. https://doi.org/10.1177/0957650921990221

8. Seo D., Shim J., Shin D. H. et al. Dropwise condensation of acetone and ethanol for a high-performance lubricant-impregnated thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 181, article 121871. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121871.

9. Seo D., Park J., Shim J. et al. Effects and limitations of superhydrophobic surfaces on the heat transfer performance of a twophase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 176, article 121446. https://doi.org/10.1016/j. ijheatmasstransfer.2021.121446.

10. Kim Y., Shin D. H., Kim J. S. et al. Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosyphon with various filling ratios. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 145, pp. 328–342. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.037

11. Kim J. S., Kim Y., Shin D. H. et al. Heat transfer and flow visualization of a two-phase closed thermosiphon using water, acetone, and HFE7100. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 187, article 116571. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116571.

12. Nikolaenko Yu. E., Pekur D. V., Kravets V. Yu. et al. Study on the performance of the low-cost cooling system for transmit/ receive module and broadening the exploitative capabilities of the system using gravity heat pipes. *ASME. Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2022, vol. 14, iss. 12, article 121001. https://doi.org/10.1115/1.4054812

13. Nikolaenko Yu. E., Pis'mennyi E. N., Pekur D. V. et al. The efficiency of using simple heat pipes with a relatively low thermal conductivity for cooling transmit/receive modules. *Applied Thermal Engineering*, 2023, article 121512. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121512

Опис статті для цитування:

Мельник Р. С., Ліпніцький Л. В., Ніколаєнко Ю. Є., Кравець В. Ю. Візуалізація процесів пароутворення та теплові характеристики тонкої плоскої гравітаційної теплової труби з різьбовим випарником. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4, с. 65–73. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2023.3-4.65

Melnyk R. S., Lipnitskyi I. V., Nikolaenko Yu. E., Kravets V. Yu. Visualization of vaporization processes and thermal characteristics of a thin flat gravity heat pipe with a threaded evaporator. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 65–73. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.65

Cite the article as:

УДК 536.248.2

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.74

Д. т. н. В. Ю. КРАВЕЦЬ¹, д. т. н. С. М. ХАЙРНАСОВ¹, М. Д. РОМАЩЕНКО¹, А. О. ДАНИЛОВИЧ²

Україна, м. Київ, ¹КПІ ім. Ігоря Сікорського; ²ІСТЕ СБ України E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІНІАТЮРНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБ ДЛЯ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Наведено результати експериментального дослідження термічного опору та максимальних теплових потоків мініатюрних теплових труб (MTT) з металоволокнистою капілярною структурою діаметром від 3 до 6 мм довжиною від 150 до 300 мм. Теплоносіями слугували вода та етанол. Дослідження проводилося за різної орієнтації MTT у просторі. Показано, що на їхні теплопередавальні характеристики впливають як геометричні, так і режимні фактори. Визначено, що мінімальний термічний опір і максимальний тепловий потік суттєво залежать від діаметра парового каналу, пористості капілярної структури та теплофізичних властивостей теплоносія. Наведено дані щодо інтенсивності тепловіддачі в зоні нагрівання залежно від розмірів парового каналу.

Ключові слова: мініатюрна теплова труба, максимальний тепловий потік, термічний опір, капілярна структура, кипіння, теплоносій, орієнтація у просторі.

Стрімкий розвиток індустрії електронних компонентів і високі темпи мініатюризації роблять актуальним завдання створення надійних систем охолодження, спроможних забезпечити ефективне відведення теплоти в умовах підвищення теплових потоків, які виділяються мініатюрними напівпровідниковими та іншими приладами. Сучасні тенденції створення ефективних мініатюрних радіоелектронних комплексів різного призначення, що функціонують під дією сил гравітації, прискорення тощо, потребують винаходження надійних систем охолодження для підтримання заданих температурних режимів. Особливо це стосується приладів електронної техніки в літакобудуванні та в космічній галузях. Одним із найефективніших засобів відведення значних теплових потоків є системи охолодження на базі теплових труб (TT), зокрема мініатюрних.

Мініатюрні теплові труби (**МТТ**) вперше були застосовані ще у 1984 році для контролю температури напівпровідникових пристроїв [1]. З того часу вони набули різноманітних застосувань — від охолодження лазерних діодів та інших приладів із локальними тепловиділеннями, контролю температури крайки крила надзвукових літаків до лікування ракових тканин із застосуванням перегріву або переохолодження [2–6].

Для визначення, чи належить теплова труба до класу мініатюрних, використовують число Бонда: $Bo = d_{nn}/l_{\kappa}$, де d_{nn} — геометричний розмір парового простору; l_{κ} — капілярна стала. Теплові труби вважають мініатюрними за умови Bo < 1 [3, 4], а деякі автори — при Bo < 2 [5, 6]).

Принцип передачі теплоти тепловими трубами будь-якої конструкції заснований на замкненому випаровувально-конденсаційному процесі [7]. Однією з важливих складових ТТ є капілярнопориста структура, розташована на внутрішній поверхні оболонки труби. Під дією капілярних сил теплоносій просочує капілярну структуру, а теплотранспортна здатність теплової труби залежить від її властивостей і властивостей рідини. Завдяки капілярній структурі ТТ може передавати теплову енергію в умовах різного її розташування відносно сил гравітації. Передусім це важливо для систем охолодження космічної електроніки, коли гравітаційна складова відсутня — в цьому випадку відведення теплоти відбувається тільки за допомогою капілярних сил [8].

Специфіка мініатюрних ТТ полягає в тому, що у передаванні ними теплової енергії визначальну роль відіграють капілярні сили та сили поверхневого натягу, а також теплофізичні властивості теплоносія [9]. До того ж, з огляду на малий поперечний переріз парового каналу ($d_{\rm nn}$ <5 мм), МТТ не можуть передавати значні теплові потоки [10]. При цьому основним стримувальним фактором є перешкоджання циркуляції теплоносія всередині МТТ, що може бути пов'язане з багатьма причинами — капілярним підсосом, гідравлічним опором, взаємодією на межі розділу «рідина — пара», швидкість руху пари, яка може досягати значень, порівнянних зі швидкістю звуку в цьому середовищі, тощо. Ще однією проблемою тут є обмеження щодо досягнення критичних теплових потоків у зоні нагріву, особливо це стосується тонких МТТ [11-14]. Досягнення такого граничного стану призводить до збільшення перепаду температури між зонами підведення і відведення теплоти та, відповідно, до зниження переданого теплового потоку.

Однією з проблем при створенні МТТ є розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі в зонах випаровування

(нагріву) та конденсації, оскільки підвищення інтенсивності тепловіддачі в цих зонах дозволить знизити термічний опір та збільшити максимальні передавані теплові потоки МТТ. При цьому результати розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі за наявними для звичайних ТТ моделями можуть відрізнятися від реальних на кілька порядків, оскільки ці моделі були отримані для кипіння на пористих структурах великого об'єму та не враховують вплив обмеженого простору, який є доволі суттєвим. Основними теплопередавальними характеристиками МТТ є термічний опір і максимальний тепловий потік. Складність процесів, що відбуваються всередині МТТ (кипіння, конденсація, переміщення пари та рідини), не дозволяє аналітично визначити їхні основні характеристики. Більшість досліджень присвячено визначенню термічного опору та величини максимального теплового потоку для конкретних конструкцій МТТ, і вкрай мало публікацій, в яких досліджуються фізичні механізми передавання теплоти всередині МТТ і вплив обмеженості простору.

Ця робота присвячена вивченню впливу геометричних і режимних факторів на термічний опір і максимальні теплові потоки мініатюрних теплових труб з мідною металоволокнистою капілярною структурою.

Зразки для досліджень та експериментальна установка

Досліджувані мініатюрні ТТ були виготовлені у лабораторії теплових труб КПІ ім. І. Сікорського. На **рис. 1** представлені зразки цих МТТ, а їхні геометричні характеристики — в **таблиці**.

Дослідження теплопередавальних характеристик МТТ проводили на установці, схематично представленій на рис. 2. Мініатюрна ТТ, оснащена омічним нагрівачем 2 і конденсатором "труба в трубі" 3, розташовувалася залежно від завдання дослідження: вертикально, коли зона конденсації (ЗК) знаходиться над зоною нагріву (**3H**) — $\phi = +90^{\circ}$; горизонтально — $\phi = 0^\circ$; вертикально, коли ЗК знаходиться під ЗН — $\phi = -90^\circ$. По всій довжині МТТ були встановлені мідь-константанові термопари 6 — по три в зонах випаровування та конденсації і дві в зоні транспорту (ЗТ). Сигнал від термопар подавався на аналоговоцифровий перетворювач (АЦП) 4 і далі на персональний комп'ютер 5. Температура фіксувалась за допомогою системи зчитування показань термопар в режимі реального часу з частотою 1 Гц. Для зниження теплових втрат до навколишнього середовища МТТ теплоізолювали базальтовим волокном із коефіцієнтом теплопровідності 0,04 Вт/(м·К). Зона конденсації омива-



Рис. 1. Зразки мідних мініатюрних теплових труб (а) та фото перерізу МТТ діаметром 6 мм (б)

Позначення МТТ	MTT1	MTT2	MTT3	MTT4	MTT5						
Зовнішній діаметр, d_{MTT} , мм	3	4	6	6	6						
Діаметр парового простору, $d_{\Pi\Pi}$ мм	1,2	2,0	3,0	4,0	4,0						
Загальна довжина, l_{Σ} , мм	300	150 175		175	230						
Довжина зони нагріву, <i>l</i> _{3H} , мм	60	61	62	60	70						
Довжина зони конденсації, l _{3K} , мм	162	68	67	60	40						
Товщина капілярної структури, б, мм	0,4	0,5	1,0	0,5	0,5						
Пористість, П, %	88	82	70	82	88						
Теплоносій	вода	вода	вода	вода	етанол						

I	Геометт	ичні ха	пакте	пистики	дослідж	уваних	мідних	MTT
1	comempi	лчні ли	ρακιπερ	Jacmana	0000110510	younna	мионил.	IVIIII



Рис. 2. Схема експериментальної установки для дослідження теплопередавальних характеристик МТТ:

ИТТ; 2 — нагрівач; 3 — конденсатор типу "труба в трубі"; 4 — аналогово-цифровий перетворювач; 5 — персональний комп'ютер; 6 — мідь-костантанові термопари

лася водою з постійною витратою $G=4,9\cdot10^{-3}$ кг/с, яку підтримували за допомогою напірного бака і контролювали за показаннями ротаметра.

Температуру води на вході в конденсатор і на виході з нього ($t_{\text{вих}}, t_{\text{вх}}$) вимірювали двома мідь-константановими термопарами, сигнал від яких також подавали на АЦП і далі на комп'ютер. Температура води на вході в конденсатор під час експерименту підтримувалася постійною: 20°C±0,5°C.

Відведений тепловий потік $Q_{\rm від}$, термічний опір $R_{\rm MTT}$ та середній коефіцієнт тепловіддачі в зоні на-гріву $\alpha_{\rm 3H}$ розраховувалися як

$$Q_{\rm BIA} = C_p \cdot G \cdot [t_{\rm BMX}(\tau) - t_{\rm BX}(\tau)]; \tag{1}$$

$$R_{\rm MTT} = \frac{\Delta t}{Q_{\rm Big}} = \frac{t_{\rm 3H} - t_{\rm 3K}}{Q_{\rm Big}}; \qquad (2)$$

$$\alpha_{3\mathrm{H}} = \frac{Q_{\mathrm{Big}}}{\left(\overline{t}_{3\mathrm{H}} - \overline{t}_{3\mathrm{T}}\right)F_{3\mathrm{H}}} = \frac{q_{3\mathrm{H}}}{\left(\overline{t}_{3\mathrm{H}} - \overline{t}_{3\mathrm{T}}\right)},\tag{3}$$

де C_p — питома теплоємність;

F_{3H} — площа зони нагріву всередині труби;

q_{3H} — густина теплового потоку в зоні нагріву;

 $\overline{t}_{_{3H}}, \overline{t}_{_{3K}}, \overline{t}_{_{3T}}$ — значення середньої температури у відповідних зонах (остання практично відповідає температурі насичення в МТТ).

Експериментальні результати та їх обговорення

Загальний термічний опір МТТ можна представити як суму опорів на всіх ділянках передавання теплоти:

$$R_{\rm MTT} = R_{\rm 3H}^{\rm CT} + R_{\rm 3H} + R_{\rm III} + R_{\rm 3K} + R_{\rm 3K}^{\rm CT}, \qquad (4)$$

де R_{3H}^{CT} , R_{3K}^{CT} — термічний опір стінки МТТ у відповідних зонах;

*R*_{3H}, *R*_{3K} — термічний опір тепловіддачі у відповідних зонах;
 *R*_{ПП} — термічний опір у паровому просторі.

В роботі [15] було показано, що основний вклад у величину $R_{\rm MTT}$ вносять термічні опори $R_{\rm 3H}$ і $R_{\rm 3K}$, значення яких залежать від інтенсивності тепловіддачі у відповідних зонах. З підвищенням теплового потоку в зоні випаровування режими теплообміну переходять від конвективного режиму кипіння до бульбашкового, й надалі можуть заходити навіть у сферу перехідного кипіння, що відповідає граничним теплопередавальним характеристикам МТТ. Серед основних характеристик, від яких суттєво залежить R_{МТТ}, можна виділити такі: кут нахилу труби, діаметр парового простору, геометричні характеристики зон МТТ і тип теплоносія. На рис. 3 для МТТЗ та МТТ4 (див. таблицю) наведено залежності, які демонструють вплив кута нахилу труби на R_{МТТ}. Тут видно, що істотно знижує теплопередачу труби протидія силам гравітації.

Як видно з рис. 3, для обох МТТ зі збільшенням теплового потоку термічний опір знижується до деякого мінімального значення, а потім починає зростати. У разі горизонтального розташування труби ($\varphi = 0^{\circ}$), коли дія сил гравітації відсутня, теплопередавальна здатність МТТ визначатиметься капілярними силами, які зі свого боку залежать від конструкційних характеристик капілярної структури. Тиск $P_{\text{кап}}$, створюваний у капілярній структурі, залежить від сил поверха)



a — MTT4 (П=82%, d_{пп}=4 мм); б — MTT3 (П=70%, d_{пп}=3 мм)

невого натягу σ і головних радіусів кривизни меніска пор r_1 та r_2 :

$$P_{\rm Karr} = \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) \sigma \cdot \cos\Theta, \tag{5}$$

де Θ — крайовий кут змочування.

З відхиленням розташування МТТ від горизонтального починають діяти сили гравітації, які або допомагають руху теплоносія до зони випаровування, або протидіють цьому. Ці сили можна врахувати за допомогою виразу для гідростатичного напору [16]

$$\Delta P_p = \rho_p g L_{eb} \sin \varphi, \tag{6}$$

де ρ_p — густина рідини;

g — прискорення вільного падіння;

 $L_{e\phi}$ — ефективна довжина МТТ, $L_{e\phi} = l_{\Sigma} - (l_{3H} + l_{3K})/2$.

Як видно з виразів (5) та (6), теплопередавальні характеристики МТТ залежать від розмірів пор капілярної структури та ефективної довжини $L_{e\phi}$. При цьому вплив кута нахилу буде тим нижче, чим менше радіус пор і вище коефіцієнт поверхневого натягу обраного теплоносія, а також чим менша відстань між зонами випаровування та конденсації ($L_{e\phi}$). З рис. З, а видно, що при розташуванні труби проти сил тяжіння (ϕ =-90°) мінімальний термічний опір дорівнює $R_{min} \approx 0.5$ К/Вт, а відповідний цьому значенню максимальний тепловий потік — $Q_{max} \approx 15$ Вт. Коли ж гравітаційні сили допомагають руху теплоносія в зону випаровування (ϕ =+90°), R_{min} знижується до 0,3 К/Вт, а Q_{max} зростає до 250 Вт.

Порівняння наведених на рис. 3 даних для МТТЗ та МТТ4 вказує на те, що зменшення діаметра парового простору $d_{\rm nn}$ призводить до збільшення термічного опору. Так, незалежно від положення у просторі, зменшення d_{nn} з 4 до 3 мм призвело до зростання R_{MTT} приблизно у два рази. При цьому слід зазначити, що одночасно зі зменшенням $d_{\rm III}$ збільшилася удвічі (до 1 мм) товщина капілярної структури, а її пористість знизилася з 82 до 70%. Також зменшився діаметр пор капілярної структури: для П=70% ефективний радіус пор капілярної структури дорівнює 35.10-6 м, для П=82% — 50·10⁻⁶ м [16, с. 49, рис. 2.4], при цьому капілярний тиск для транспорту теплоносія із зони конденсації до зони нагріву збільшується приблизно в 1,5 раза. В результаті спостерігається значне зростання Q_{\max} , особливо при розташуванні МТТ проти сил тяжіння.

На **рис.** 4 представлено зміну термічного опору залежно від теплового потоку для МТТ2 за її різної орієнтації у просторі. Тут видно, що характер залежностей такий самий, як і для МТТ більшого діаметра (див. рис. 3), але величини передаваних теплових потоків істотно нижчі. Це насамперед пов'язано зі зменшенням розмірів парового простору, що позначається на про-



цесі виникнення парової фази в зоні нагріву, на її русі в зону конденсації та на самому процесі конденсації.

Як і в описаному для МТТ4 випадку, для всіх досліджуваних зразків МТТ найбільші теплові потоки спостерігалися при їх вертикальному розташуванні, коли зона конденсації знаходилася над зоною нагріву (ϕ =+90°), тобто сили гравітації разом з капілярними силами допомагали поверненню теплоносія до ЗН. Мінімальними були теплові потоки, коли зверху знаходилася зона нагріву (ϕ =-90°), тобто сили гравітації протидіяли поверненню теплоносія до ЗН.

Вище зазначалося, що при горизонтальному розташуванні ($\varphi = 0^{\circ}$) повернення теплоносія до зони нагріву здійснюється тільки завдяки капілярної структури — чим менша пористість, тим вищі капілярні сили, а значить МТТ може передавати вищі теплові потоки. Однак за однакової товщини та пористості капілярної структури на значення Q_{max} та R_{min} істотно впливає діаметр парового простору в МТТ. У цьому випадку починають діяти сили гідравлічного опору при русі парової фази до зони конденсації. Чим більше швидкість руху пари, тим більшим стає вплив гідравлічного опору на загальний термічний опір, а теплопередавальна здатність МТТ погіршується. Так, на **рис. 5** показано, що зі зменшенням $d_{\text{пп}}$ величина R_{min} суттє-





Рис. 6. Залежність термічного опору МТТ діаметром $d_{\rm MTT} = 6$ мм, заправленої етанолом, від підведеного теплового потоку за різної її орієнтації у просторі (МТТ5: П=88%, $d_{\rm nr} = 4$ мм)

во зростає. Узагальнення отриманих експериментальних даних для МТТ, розташованих вертикально при $\phi = +90^{\circ}$, дозволило отримати емпіричну залежність

$$R_{\min} = 1,75d_{nn}^{-1,32}.$$
(7)

Ця формула справедлива для МТТ з діаметром парового простору 1-4 мм і капілярною структурою товщиною $0,5\pm0,1$ мм пористістю 80-90% (теплоносій — вода).

Крім розмірів парового простору і пористості капілярної структури істотний вплив на термічний опір МТТ має і вид теплоносія. При цьому значну роль відіграють такі його теплофізичні властивості, як теплота пароутворення і коефіцієнт поверхневого натягу. На **рис. 6** представлено дані щодо термічного опору для МТТ, заправленої етанолом.

Якщо порівняти цей рисунок з даними для МТТ4 на рис. 3, *a*, то видно, що для вертикального розташування $\varphi = +90^{\circ}$ величина максимального відведеного теплового потоку у випадку використання етанолу значно нижча (не перевищує 50 Вт), ніж при використанні води (понад 250 Вт). При горизонтальному розташуванні МТТ5 мінімальний термічний опір збільшується до $R_{\min} \approx 1,5$ К/Вт, а відповідно, значення максимального теплового потоку при цьому зменшується до $Q_{\max} \approx 10$ Вт, що набагато гірше, ніж для МТТ4 (60 Вт).

Величина загального термічного опору МТТ значно залежить і від інтенсивності тепловіддачі в зоні нагрівання, на яку суттєво впливають умови евакуації парової фази із зони нагрівання. За фіксованої довжини зони випаровування зменшення габаритів парового простору призводить до підвищення перепаду тиску між зонами нагріву та конденсації і, відповідно, до збільшення коефіцієнта тертя у паровому тракті, а в результаті — до зміни інтенсивності тепловіддачі в зоні нагрівання МТТ.

На рис. 7 показано, що зменшення діаметра парового простору призводить до зниження коефі-



Рис. 7. Залежність коефіцієнта тепловіддачі в зоні нагріву від відведеного питомого теплового потоку для МТТ з d_{пп}=4 мм (1) та d_{пп}=2 мм (2) в умовах горизонтального розташування

цієнтів тепловіддачі ав зоні нагріву МТТ. Причому для $d_{\rm nn}=4$ мм ($d_{\rm MTT}=6$ мм) $\alpha \sim q^{0.35}$, а для $d_{\rm nn}=2$ мм ($d_{\rm MTT}=4$ мм) $\alpha \sim q^{0.2}$. Дані отримано для горизонтального розташування МТТ.

Якщо враховувати, що при кипінні у великому об'ємі коефіцієнт тепловіддачі α пропорціональний $q^{0.8}$, то в умовах обмеженого парового простору змінюється інтенсивність тепловіддачі у бік зниження, що значною мірою впливає на теплопередавальну здатність мініатюрних теплових труб.

Висновки

Таким чином, проведене дослідження показало, що при протіканні випаровувально-конденсаційних процесів в умовах обмеженого простору, що характерно для мініатюрних теплових труб, коефіцієнт тепловіддачі в зоні нагріву істотно знижується порівняно зі звичайними TT великого розміру.

Збільшення товщини капілярної структури та зменшення пористості знижують вплив сил гравітації на характеристики МТТ та збільшують максимальні теплові потоки.

Зменшення діаметра парового каналу призводить до зростання загального термічного опору МТТ, і для його зниження необхідно застосовувати капілярну структуру з параметрами, які б, з одного боку, збільшували капілярний тиск, а з іншого — забезпечували б вільну евакуацію парової фази до парового каналу.

Застосування легкокиплячих теплоносіїв призводить до зниження максимальних теплових потоків і збільшення мінімального термічного опору МТТ порівняно з водою.

Під час проєктування мініатюрних теплових труб для систем охолодження малогабаритних об'єктів необхідно враховувати велику кількість факторів, що впливають на теплопередавальну здатність МТТ.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Cotter T.P. Principles and prospects of micro heat pipes. *Proc.* 5th Int. Heat Pipe Conf. Tsukuba, Japan. 1984. pp. 328–335.

2. Peterson G.P. Investigation of micro heat pipes fabricated as an integral part of silicon wafers. 8^{th} International heat pipe conference. Bejing, China, 1992, pp. 1–11.

3. Faghri A. Advances and challenges in micro/miniature heat pipes. *11th Int. Heat Pipe Conf. Musashinoshi*, 1999, Tokyo, Japan, vol. 3, pp. 1–18.

4. Mantelli M.B.H. *Thermosyphon and heat pipes: Theory and applications*. Switzerland, Springer, 2021, 420 p.

5. Chen H., Groll H., Rosler S. Micro heat pipes: experimental investigation and theoretical modelling. 8^{th} Int. Heat Pipe Conf. Bejing, China, 1992, pp. 1–5.

6. Reay D., Kew P., Mcglen R. *Heat pipes theory, design and applications*. USA, Elsevier Ltd, 2014, 251 p.

7. Wang W., Cai Y., Wang L. et al. Thermo-hydrodynamic analytical model, numerical solution and experimental validation of a radial heat pipe with internally finned condenser applied for building heat recovery units. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 219, pp.113041. https://doi.org/10.1016/j. enconman.2020.113041

8. Kravets V., Alekseik Ye., Alekseik O. et al. Heat pipes with variable thermal conductance property developed for space applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31, pp. 2613–2620. https://doi.org/10.1007/s12206-017-0503-8

9. Liu D., Tang G., Zhao Fu., Wang H. Modeling and experimental investigation of looped separate heat pipe as waste heat recovery facility. *Applied Thermal Engineering*, 2006, vol. 26, iss. 17–18, pp. 2433–2441. https://doi.org/10.1016/j. applthermaleng.2006.02.012

10. Velardo J., Singh R., Ahamed M. Sh. et al. Thin thermal management modules using flattened heat pipes and piezoelectric fans for electronic devices. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 2021, vol. 17–1, 11 p. https://doi.org/10.5098/hmt.17.1

11. Han X., Wang Y., Liang Q. Investigation of the thermal performance of a novel flat heat pipe sink with multiple heat sources. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 94, pp. 71–76. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.03.017

12. Koito, Y. Numerical analyses on vapor pressure drop in a centered-wick ultra-thin heat pipe. *Frontiers in Heat and Mass Transfer* (*FHMT*), 2019, vol. 13–26, 6 p. http://dx.doi.org/10.5098/hmt.13.26

13. Mochizuki M., Nguyen T. Review of various thin heat spreader vapor chamber designs, performance, lifetime reliability and application. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 2019, vol. 13–12, 6 p. http://dx.doi.org/10.5098/hmt.13.12

14. Li J., Lv L., Zhou G., Li X. Mechanism of a microscale flat plate heat pipe with extremely high nominal thermal conductivity for cooling high-end smartphone chips. *Energy Convers Manage*, 2019, vol. 201, 112202. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112202

15. Кравець В.Ю. Процеси теплообміну у мініатюрних випарно-конденсаційних системах охолодження. Харьків, ФОП Бровін О.В., 2018, 288 с.

16. Семена М.Г, Гершуни А.Н., Зарипов В.К. *Тепловые трубы* с металловолокнистыми капиллярными структурами. Київ, Вища школа, Головне вид-во, 1984, 215 с.

Дата надходження рукопису до редакції 21.11 2023 р.

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.74 UDC 536.248.2

V. Yu. KRAVETS¹, S. M. KHAIRNASOV¹, M. D. ROMASHCHENKO¹, A. O. DANYLOVICH²

Ukraine, Kyiv,¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; ²ISEE SSU E-mail: kravetz kpi@ukr.net

HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF MINIATURE HEAT PIPES FOR COOLING SYSTEMS FOR ELECTRONICS

Decrease in mass and dimensional characteristics of semiconductor devices with simultaneous increase in allocated power dissipation creates conditions of heat-loaded operation of the most critical elements of radio-electronic equipment. Such growth of heat flows requires effective small-size systems for maintaining safe temperature conditions of electronic equipment and its reliable functioning. The use of miniature heat pipes (MHP) commensurate in size with the microchip crystals can significantly reduce their temperature level of operation.

The paper presents the experimental results of investigation of thermal resistance and maximum heat fluxes of miniature heat pipes with diameters from 3 to 6 mm and lengths from 150 to 300 mm with metal-fiber capillary structure. The porosity of the capillary structure varied from 70% to 88%. Water and ethanol were used as coolants. The study was carried out at different orientations of MHPs in space: vertical by gravity forces, horizontal, and vertical against gravity forces (+90°, 0°, -90°).

It is shown that the heat transfer characteristics of the MHPs are affected by both geometric and mode factors. It is determined that the minimum thermal resistance and maximum heat flux significantly depend on the diameter of the vapor channel, porosity of the capillary structure and thermal physical properties of the heat transfer medium. The data on the heat transfer intensity in the heating zone depending on the size of the vapor channel are given. It is shown that decreasing the diameter of the vapor space of MHPs worsens their heat transfer characteristics.

Key words: miniature heat pipe, maximum heat flux, thermal resistance, capillary structure, boiling, heat carrier, space orientation.

REFERENCES

1. Cotter T.P. Principles and prospects of micro heat pipes. *Proc.* 5th *Int. Heat Pipe Conf.* Tsukuba, Japan. 1984. pp. 328–335.

2. Peterson G.P. Investigation of micro heat pipes fabricated as an integral part of silicon wafers. δ^{th} International heat pipe conference. Bejing, China, 1992, pp. 1–11.

3. Faghri A. Advances and challenges in micro/miniature heat pipes. *11th Int. Heat Pipe Conf. Musashinoshi*, 1999, Tokyo, Japan, vol. 3, pp. 1–18.

4. Mantelli M.B.H. *Thermosyphon and heat pipes: Theory and applications*. Switzerland, Springer, 2021, 420 p.

5. Chen H., Groll H., Rosler S. Micro heat pipes: experimental investigation and theoretical modelling. δ^{th} Int. Heat Pipe Conf. Bejing, China, 1992, pp. 1–5.

6. Reay D., Kew P., Mcglen R. *Heat pipes theory, design and applications*. USA, Elsevier Ltd, 2014, 251 p.

7. Wang W., Cai Y., Wang L. et al. Thermo-hydrodynamic analytical model, numerical solution and experimental validation of a radial heat pipe with internally finned condenser applied for building heat recovery units. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 219, pp.113041. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113041

8. Kravets V., Alekseik Ye., Alekseik O. et al. Heat pipes with variable thermal conductance property developed for space applications. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31, pp. 2613–2620. https://doi.org/10.1007/s12206-017-0503-8

9. Liu D., Tang G., Zhao Fu., Wang H. Modeling and experimental investigation of looped separate heat pipe as waste heat recovery facility. *Applied Thermal Engineering*, 2006, vol. 26, iss. 17–18, pp. 2433–2441. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.012 10. Velardo J., Singh R., Ahamed M. Sh. et al. Thin thermal management modules using flattened heat pipes and piezoelectric fans for electronic devices. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 2021, vol. 17–1, 11 p. https://doi.org/10.5098/hmt.17.1

11. Han X., Wang Y., Liang Q. Investigation of the thermal performance of a novel flat heat pipe sink with multiple heat sources. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 94, pp. 71–76. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.03.017

12. Koito, Y. Numerical analyses on vapor pressure drop in a centered-wick ultra-thin heat pipe. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 2019, vol. 13–26, 6 p. http://dx.doi.org/10.5098/hmt.13.26

13. Mochizuki M., Nguyen T. Review of various thin heat spreader vapor chamber designs, performance, lifetime reliability and application. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 2019, vol. 13–12, 6 p. http://dx.doi.org/10.5098/hmt.13.12

14. Li J., Lv L., Zhou G., Li X. Mechanism of a microscale flat plate heat pipe with extremely high nominal thermal conductivity for cooling high-end smartphone chips. *Energy Convers Manage*, 2019, vol. 201, 112202. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112202

15. Kravets' V.Yu. *Protsesy teploobminu u miniatyurnykh vyp-arno-kondensatsiynykh systemakh okholodzhennya* [Heat exchange processes in miniature evaporative-condensation cooling systems]. Kharkiv, FOP Brovin O.V., 2018, 288 p.

16. Semena M.G, Gershuni A.N., Zaripov V.K. *Teplovyye truby s metallovoloknistymi kapillyarnymi strukturami* [Heat pipes with metal fiber capillary structures]. Kyiv, Vishcha shkola, 1984, 215 p.

Опис статті для цитування:

Кравець В. Ю., Хайрнасов С. М., Ромащенко М. Д., Данилович А. О. Теплопередавальні характеристики мініатюрних теплових труб для систем охолодження електронної техніки. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4, с. 74–80. http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.74 Cite the article as:

Kravets V. Yu., Khairnasov S. M., Romashchenko M. D., Danylovich A. O. Heat transfer characteristics of miniature heat pipes for cooling systems of electronic techniques. Technology and design in electronic equipment, 2023, no. 3–4, pp. 74–80. http://dx.doi. org/10.15222/TKEA2023.3-4.74

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Белоха Галина Сергіївна, канд. техн. наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

Бондаренко Олександр Федорович, канд. техн. наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

Глушеченко Едуард Миколайович, канд. техн. наук, нач. відд., НПП "Сатурн", м. Київ

Горський Петро Володимирович, докт. фіз.-матем. наук, ст. наук. співроб., Інститут термоелектрики НАН та МОН України, м. Чернівці

Коваль Вікторія Михайлівна, канд. техн. наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

Косой Борис Володимирович, докт. техн. наук, директор, Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнологій та екоенергетики, м. Одеса

Круковський Семен Іванович, докт. техн. наук, керівник відділу, НВП «Карат», м. Львів

Трофімов Володимир Євгенович, канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

Сафронов Павло Сергійович, канд. техн. наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ Стевич Зоран, Dr. Sc., Белградський університет (University of Belgrade), Сербія Шабашкевич Борис Григорович, директор, НВФ "ТЕНЗОР", м. Чернівці

Видавець і виготовлювач версії Online ПП «Політехперіодика», а/с 17, м. Одеса, 65044 E-mail: tkea.journal@gmail.com Web-caйт: www.tkea.com.ua, тел. +38 099 444 63 52 Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008

Підписано до друку 19.12 2023 р. Формат 60×84 1/8. Друк. арк. 10,5. Тираж 100 прим. Зам. № 155/156 Оригінал-макет виготовлено у видавництві «Політехперіодика» Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008 р. (65044, м. Одеса, а/с 17)

> Надруковано ФОП Побута М. І. з готового оригінал-макета (65044, м. Одеса, пр-т. Шевченка, 1а)

