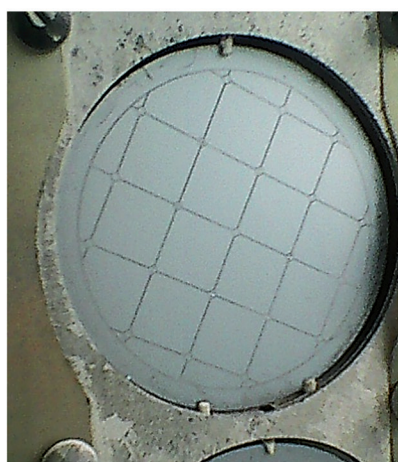
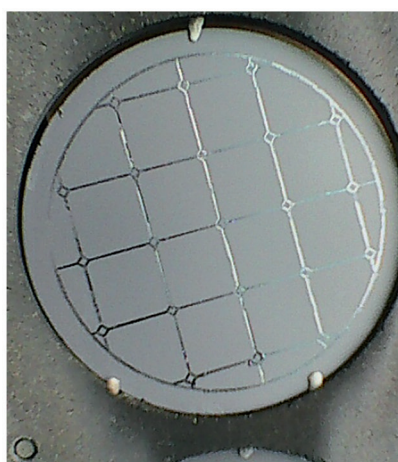


ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



Стартова поверхня

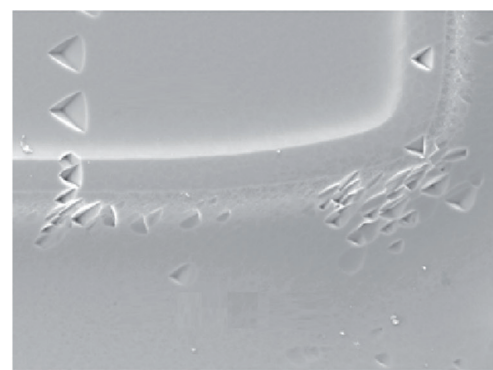


Фінішна поверхня



Зображення зон в перехресті

Пластины (110) в касеті після термоміграції



Межа зони термоміграції

До статті
«Термоміграція довільно орієнтованих
рідких лінійних зон Al–Si крізь
пластини кремнію (110)»

5—6 2021

ВЕРЕСЕНЬ — ГРУДЕНЬ

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

ISSN 2309-9992 (Online)

Виходить один раз в 2 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)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

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

Контактна інформація

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

Редакція

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

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

2021 № 5–6

Рік видання 45-й

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 № 6 від 21.12.2021 р.)
Відп. за випуск: О. А. Тихонова

ЗАСНОВНИКИ

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

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

ЗМІСТ

Сенсоелектроніка

Квазісинхронна термокомпенсація в іонометрії із застосуванням ІСПТ. Частина 2: Практична реалізація. Павлюченко О. С., Кукла О. Л. 3

Новий підхід до підвищення чутливості газового сенсора на основі плівок нанокристалічного карбиду кремнію. Семенов О. В., Любов Д. В. 11

НВЧ-техніка

Методи вимірювання та математична модель основних характеристик хвильоводно-коаксіальних з'єднувачів. Глушеченко Е. М. 16

Контроль працездатності НВЧ-каналів приймання телеметричної інформації за непрямыми критеріями. Чміль В. В. 20

Мікропроцесорні пристрої та системи

Порівняння точності позиціювання методом трилатерації та методом на базі генетичного алгоритму. Ямненко Ю. С., Осокін В. О. ... 26

Технологічні процеси та обладнання

Термоміграція довільно орієнтованих рідких лінійних зон Al-Si крізь пластини кремнію (110). Полухін О. С., Кравчина В. В. 33

Забезпечення теплових режимів

Критичні теплові потоки при кипінні в умовах капілярного транспорту у двофазних системах термостабілізації. Мельник Р. С., Кравець В. Ю., Ліпницький Л. В. 41

Візуалізація процесів пароутворення у двофазному термосифоні за різної його орієнтації в просторі. Мельник Р. С., Ліпницький Л. В., Ніколаєнко Ю. С., Кравець В. Ю., Пекур Д. В. 46

Рецензенти номера 52

Нові книги 32

CONTENTS

Sensors

Quasi-synchronous thermocompensation for ISFET-based ionometric devices. Part 2: Implementation. *Pavluchenko A. S., Kukla A. L.* 3

A new approach to increasing the sensitivity of a gas sensor based on nanocrystalline silicon carbide films. *Semenov A., Lubov D.* 11

Microwave engineering

Measurement methods and mathematical model of main characteristics of waveguide-coaxial connectors. *Glushechenko E. M.* 16

Monitoring the efficiency of microwave channels for receiving telemetry information using indirect criteria. *Chmil V.V.* 20

Microprocessor-based devices and systems

Comparison of mobile robot positioning techniques. *Yamnenko Yu. S., Osokin V. O.* 26

Production technology and equipment

Thermomigration of non-oriented aluminium-rich liquid zones through (110) silicon wafers. *Polukhin O. S., Kravchina V. V.* 33

Thermal management

Critical heat fluxes during boiling under capillary transport conditions in two-phase thermostabilization systems. *Melnyk R. S., Kravets V. Yu., Lipnitsky L. V.* 41

Visualization of vaporization events in two-phase thermosyphons operating in different orientations. *Melnyk R. S., Lipnitskyi L. V., Nikolaenko Yu. E., Kravets V. Yu., Pekur D. V.* 46

Reviewers 52

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 Odessa Polytechnic National University, SPE «Saturn», SRC «Elektron-Carat»

Approved for publication by Odessa Polytechnic National University Academic Council (Summary Records No. 6, 21.12.2021)

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); Odessa Polytechnic National University; Publishing house «Politehperiodika» (Odessa)

Registration certificate № KB 21788-11688П of 21.12.2015

О. С. ПАВЛЮЧЕНКО, д. ф.-м. н. О. Л. КУКЛА

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

E-mail: pavluchenko@isp.kiev.ua

КВАЗИСИНХРОННА ТЕРМОКОМПЕНСАЦІЯ В ІОНОМЕТРІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІСПТ.

Частина 2: Практична реалізація

Наведено другу частину роботи, де представлено варіант реалізації вторинного вимірювального перетворювача (ВВП) для іонометричних датчиків на основі іон-селективних польових транзисторів (ІСПТ). Особливістю запропонованого ВВП є можливість програмного керування напругою зміщення ІСПТ, завдяки чому ІСПТ можна використовувати як датчик температури. Послідовне переключення між іонометричним й термометричним режимами роботи датчика з подальшою алгоритмічною обробкою отриманих даних мікропроцесором, який входить до складу ВВП, дозволяє компенсувати температурну залежність електродного потенціалу ІСПТ. Наведено принципові електричні схеми основних вузлів ВВП та експериментальні оцінки термометричної характеристики ІСПТ-датчика й ефективності термокомпенсації.

Ключові слова: іон-селективний польовий транзистор, іонометрія, компенсація температурної залежності, термодатчик, вимірювальний перетворювач.

Ця публікація є продовженням роботи [1], де були викладені загальні принципи побудови іонометричного перетворювача з твердотільними іон-чутливими електродами, що водночас виконують роль термодатчиків, і продемонстрована можливість застосування такого перетворювача для реалізації іономіра з функцією компенсації температурної залежності електродного потенціалу без використання додаткового термометричного тракту. Суміщення двох функцій (іонометричної та термометричної) в одному датчику досягається при цьому завдяки структурі вимірювального перетворювача, воно не пов'язане з будь-якими специфічними особливостями самих датчиків, за винятком звичайних технологічних елементів, спільних для всіх польових транзисторів, в тому числі іон-селективних (ІСПТ).

Ключовими компонентами запропонованого в [1] вимірювального перетворювача (ВВП) є керуване мікропроцесором джерело напруги зміщення ІСПТ і трансімпедансний підсилювач (перетворювач «струм — напруга»), здатний перетворювати входні сигнали будь-якої полярності. В першій частині роботи була розглянута принципова схема аналогової частини ВВП в загальному вигляді з представленням деяких її елементів моделями ідеальних джерел напруги, побудована без врахування низки вимог, що висуваються до реального вимірювального приладу і які потрібно враховувати під час проектування. Для симуляції роботи схеми використовувались ідеалізовані моделі пасивних і активних компонентів з комплектної бібліотеки моделей програмного забезпечення MicroCap [2], при цьому ІСПТ-датчик заміщувався еквівалентною схемою на основі моде-

лі серійного p -канального польового транзистора з вертикальним каналом, який виготовляється методом подвійної дифузії. Реальні ІСПТ відрізняються від використаної моделі щонайменш у відношенні геометрії та розмірів областей легування, що може позначатися на температурних залежностях їхніх характеристик.

В цій частині роботи більш детально розглядається конкретний варіант реалізації запропонованої структури вимірювального перетворювача, призначеного для використання з датчиком, виготовленим відповідно до описаних нами раніше конструкції та технології [3].

Приклад реалізації електричних схем основних компонентів ВВП

Обговорюваний в цій роботі вимірювальний перетворювач був практично реалізований в розроблюваному зараз в Інституті фізики напівпровідників НАНУ прототипі сигналізатора загальної токсичності (СЗТ) водних розчинів. Прилад призначається для токсикометричного аналізу рідких зразків за допомогою набору біосенсорів, в основі яких лежать розроблені раніше в ІФН НАНУ здвоєні ІСПТ-перетворювачі [3, 4]. Електрична схема СЗТ містить вісім ідентичних вимірювальних каналів, що обслуговують чотири диференційні пари датчиків. Цифрова частина вимірювальної схеми, до якої входять аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), мікропроцесор, оперативна та напівпостійна пам'ять і підсистема формування синхросигналів, реалізується мікропроцесорним ядром та вбудованими периферійними модулями центрального мікроконтролера прила-

ду (використовувалась мікросхема ATSAM20G16, Atmel Corp., нині Microchip Inc.). Вхідні аналогові кола вторинного вимірювального перетворювача (ВВП) в основному відповідають модельній схемі, наведеній в [1], але містять низку допоміжних фільтрувальних та захисних елементів — зокрема, супресорів для захисту від розрядів статичної електрики, оскільки ІСПТ-датчики підключаються до зовнішнього роз'єму на корпусі приладу. Принципову схему аналогової частини одного каналу ВП показано на **рис. 1**.

Основу аналогової частини вимірювального каналу ВВП складає перетворювач «струм — напруга» із зміщеною спільною точкою, придатний до перетворення струмів, що протікають через ІСПТ-датчик в обидвох напрямках — тобто через канал транзистора та через $p-n$ -перехід «стік — підкладка» при прикладанні до виток/підкладки напруги зворотної полярності. Цей вузол реалізується за допомогою операційного підсилювача (ОП) DA1.

Коефіцієнт перетворення «струм — напруга» визначається опором резистора R5 і в розглядуваному варіанті ВП складає 1,5 В/мА ($R5 = 1,5$ кОм). Опір R3 визначає крутизну (чутливість) перетворення напруги «стік — підкладка» у вимірюваний струм в режимі вимірювання температури при $V_s < V_{ref}$. За номінальної величини $R3 = 510$ Ом чутливість складає 1,96 мкА/мВ.

Резистор $R4 = 390$ Ом $\approx R3 \parallel R5$ компенсує розбаланс напруг на входах ОП, викликаний струмами зміщення вхідних каскадів останнього.

Для забезпечення сили струму, що потрапляє приблизно в середину діапазону вимірюваних струмів

(від -1 до $+1$ мА), в режимі вимірювання температури напруга зміщення датчика встановлюється рівною V_s [В] $\approx V_{ref} - 0,6 - R3$ [Ом] $\cdot 5 \cdot 10^{-4} \approx 0,765$ В.

Ємність $C1 = 0,22$ мкФ служить для фільтрації імпульсних завад на лінії живлення ОП. Ємності $C2 = 1$ мкФ та $C3 = 0,22$ мкФ призначаються для попередньої фільтрації власних шумів ІСПТ-датчика й шумів джерела опорної напруги V_{ref} відповідно. Номінальні значення цих ємностей обираються, головним чином, виходячи з вимог конструкції (геометрії й габаритів друкованої плати) та з міркувань скорочення номенклатури елементів схеми, і за потреби можуть бути збільшені.

АЦП тактується синхросигналом з номінальною частотою $f_{CLK_ADC} = 93750$ Гц. Вибірка й перетворення одного значення потребують семи тактів синхросигналу, при цьому послідовно опитуються вісім вимірювальних каналів. Ефективна частота вибірки в одному каналі таким чином дорівнює $f_{sample} = 93750/7/8 \approx 1674$ Гц.

Постійна часу $R5 \cdot C2$ має задовольняти умові $R5 \cdot C2 > \kappa/(\pi \cdot f_{sample})$. (1)

Якщо коефіцієнт запасу $\kappa = 1$, права частина тут дорівнює приблизно 190 мкс. Необхідне значення κ визначається реальними динамічними характеристиками (спектральним складом) оцифрованого сигналу та рівнем присутніх у сигналі шумів. За вказаних вище номіналів R5 і C2 нерівність (1) виконується при коефіцієнті $\kappa = 7,89$.

Елементи R6, VD3 служать для захисту входів АЦП у тих випадках, коли напруга на виході операційного підсилювача перевищує гранично допустимі

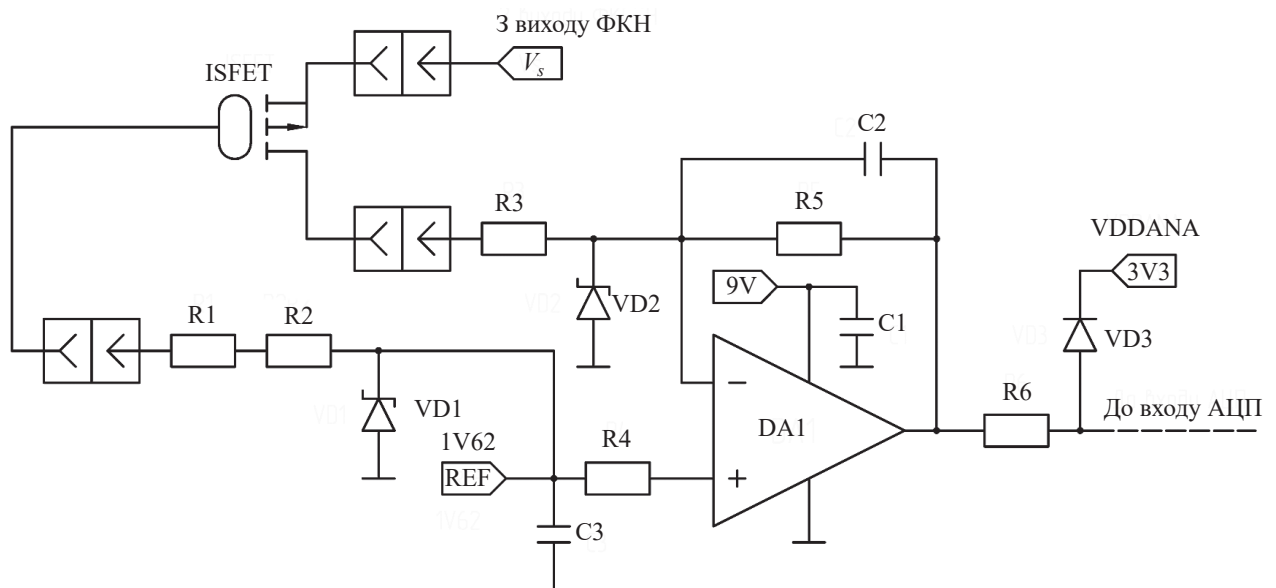


Рис. 1. Принципова схема вхідної аналогової частини іонметричного ВП:

ФКН — формувач керуючої напруги (напруги зміщення) датчика; V_s — напруга зміщення ІСПТ; REF (1V62) — напруга умовного нуля (V_{ref}); 9V — напруга живлення операційного підсилювача DA1; VDDANA (3V3) — напруга живлення аналогових компонентів мікроконтролера

ме значення ($V_{DDANA} + 0,6 \text{ В} = 3,9 \text{ В}$). Опір R_6 має бути достатньо великим для обмеження струму діода VD_3 в найгіршій можливій ситуації (напруга на виході ОП біля 9 В), але при цьому не має погіршувати динамічні характеристики входу АЦП. Згідно з паспортними даними мікроконтролера, для виконання останньої вимоги має виконуватись нерівність

$$1/(2f_{\text{ADC_CLK}}) > 9,02 \cdot (R_4 + R_{\text{SH}}) \cdot C_{\text{SH}} \quad (2)$$

де R_{SH} , C_{SH} — послідовний вхідний опір та ємність вибірки й зберігання АЦП. Паспортні значення R_{SH} та C_{SH} складають, відповідно, $3,5 \text{ кОм}$ та $3,5 \text{ пФ}$. Таким чином, опір R_6 має задовольняти умові

$$R_6 < 1/(9,02 \cdot 2f_{\text{ADC_CLK}} \cdot C_{\text{SH}}) - R_{\text{SH}} \approx 165 \text{ кОм}. \quad (3)$$

За обраного номіналу $R_6 = 2 \text{ кОм}$ ця вимога виконується із значним запасом.

Захисним діодом VD_3 може бути діод Шоткі з малою величиною падіння напруги в прямозміщеному стані, наприклад $BAT54$.

Елементи схеми R_1 , R_2 , VD_1 , VD_2 служать для захисту кіл, що виводяться на зовнішній роз'єм на корпусі приладу, від розрядів статичної електрики. Для захисту інвертуючого входу ОП струмовимірювального каналу використовується супресор VD_2 , який встановлюється безпосередньо біля виводу мікросхеми ОП. Роль баластного опору при цьому виконує резистор R_3 . Оскільки струм протікання супресора за такого його включення безпосередньо віднімається від вимірюваного струму датчика, в ролі VD_2 необхідно використовувати супресори з низьким струмом протікання, наприклад діоди серії $MMBZxAL$ виробництва NXP Semiconductors (нині Nexperia). Пробійну напругу супресорів доцільно обирати близькою до напруги живлення ОП, тобто використовувати діоди $MMBZ12VAL$ (робоча напруга $8,5 \text{ В}$) або $MMBZ15VAL$ (робоча напруга 12 В).

Неінвертуючий вхід ОП струмовимірювального каналу з'єднується (через резистор R_4) зі спільним джерелом опорної напруги V_{ref} , відповідно, з виво-

дом зовнішнього роз'єму. Для цієї лінії використовується колективний (спільний для всіх восьми каналів перетворення) захист у вигляді супресора VD_1 і низькоомних баластних резисторів $R_1 = R_2 = 5R_1$. Два послідовно з'єднаних резистори використовуються в цілях уніфікації номенклатури елементів схеми й водночас для збільшення ефективної пробійної напруги баластного опору. З парної сторони зовнішнього роз'єму до джерела V_{ref} підключається високоімпедансне навантаження (електрод порівняння), тому присутність додаткових баластних резисторів не перешкоджає нормальній роботі схеми. В ролі VD_1 можна використовувати супресор з меншою ніж у VD_2 пробійною напругою (наприклад $MMBZ6V8AL$, з робочою напругою $4,5 \text{ В}$). Паразитна ємність і струм протікання VD_1 не мають суттєвого значення з точки зору функціональної придатності схеми.

Напруга зміщення спільної точки V_{ref} , що визначає рівень умовного нуля для ІСПТ-датчика, перетворювача «струм — напруга» та АЦП, задається за допомогою мікросхеми шунтуючого регулятора $LM4041$ (Texas Instruments). Величина V_{ref} є фіксованою для обраного варіанта реалізації схеми, а її номінальне значення ($1,62 \text{ В}$) відповідає приблизно середині діапазону напруг перетворюваних АЦП (тобто половині опорної напруги АЦП, яка в нашому випадку дорівнює $3,3 \text{ В}$).

Напруга керування датчиком V_s формується за допомогою фільтрації цифрового сигналу, який надходить з виходу широтно-імпульсного модулятора (ШІМ), керованого вбудованим таймером мікроконтролера. Це дозволяє задавати величину V_s програмно і змінювати її в процесі роботи приладу, завдяки чому й здійснюється перемикання між термометричним та іонометричним режимами роботи. Частота модуляції ШІМ складає $5,86 \text{ кГц}$, роздільна здатність модулятора — до 12 двійкових розрядів. Принципову схему аналогової частини формувача керуючої напруги (ФКН) наведено на **рис. 2**.

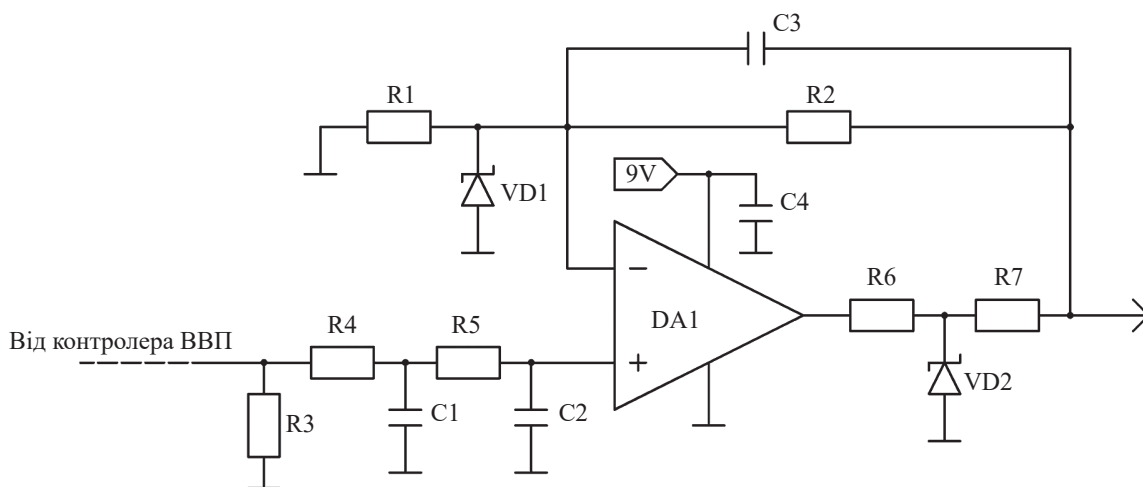


Рис. 2. Принципова схема аналогової частини (крайового каскаду) формувача керуючої напруги датчиків

Фільтр низьких частот ФКН утворюється елементами схеми $R_1, R_2, R_4, R_5, C_1, C_2, C_3$. Номінали елементів $R_1 = R_1, R_2 = R_2, R_4 = R_5 = R, C_1 = C_2 = C_3 = C$ фільтра обираються таким чином, щоб він забезпечував підсилення постійної складової з коефіцієнтом $\approx 2,5$ і придушення на частоті модуляції ШІМ не менше 80 дБ. При цьому опір R має бути достатньо великим, щоб фільтр не створював надмірного навантаження на цифровий порт контролера. В схемі прототипу СЗТ використовуються елементи з номінальними значеннями $R = 20$ кОм, $R_1 = 2$ кОм, $R_2 = 3$ кОм та $C = 0,22$ мкФ. За таких значень параметрів фільтра розрахункова величина придушення на частоті 5,86 кГц складає 88,3 дБ.

Вхід фільтра ФКН безпосередньо з'єднано з виходом широтно-імпульсного модулятора контролера ВВП. На початковому етапі роботи пристрою, до завершення процедури встановлення конфігурації портів вводу/виводу, виходи контролера перебувають у високоімпедансному стані і не мають визначеного потенціалу. Це може призводити до виникнення викидів напруги на виході фільтра в момент вмикання живлення, що є небажаним, якщо під час вмикання до приладу приєднаний датчик. Для запобігання такій ситуації до схеми ФКН включено резистор $R_3 = 120$ кОм, який фіксує потенціал входу фільтра на рівні спільної точки схеми при відключеному виході ШІМ.

Для захисту мікросхеми ОП ФКН використовується пара супресорів VD_1, VD_2 з напругою пробою близькою до напруги живлення ОП (MMBZ12VAL або MMBZ15VAL, як і в колах захисту схеми рис. 1). Величина струму протікання супресорів в нормальному режимі роботи (за допробійних значень напруги) на функціональні характеристики ФКН істотно не впливає. Два супресора необхідні, оскільки інвертуючий вхід ОП фільтра ФКН з'єднується з виводом зовнішнього роз'єму через коло зворотного зв'язку ($C_3 \parallel R_2$). Коло R_6, VD_2, R_7 має Т-подібну топологію для ізоляції виходу ОП від паразитної ємності супресора та запобігання самозбудження підсилювача. Резистори $R_6 = R_7$ з номінальним опором 5,1 Ом виконують струмообмежувальну функцію. Слід зазначити, що в процесі розробки конструкції приладу необхідно приділяти увагу вибору типорозмірів компонентів захисних кіл. Хоча в штатному режимі роботи іоніра резистори в захисних колах (R_2, R_6, R_7) не розсіюють велику потужність і не зазнають впливу високих напруг, під час спрацювання захисту навантаження на ці елементи може зростати багаторазово, тому в цих частинах схеми рекомендується використовувати резистори збільшених габаритів.

Величина напруги на виході фільтра ФКН залежить як від скважності сигналу, який надходить з виходу ШІМ-контролера, так і від його амплітуди. Остання визначається напругою живлення та деталя-

ми реалізації цифрового порту контролера і може варіюватися від екземпляра до екземпляра мікросхеми. Крім цього, в околах нульового й максимального значень коефіцієнту заповнення ШІМ функція перетворення ФКН очікувано відхиляється від лінійної. Ці ускладнення долаються шляхом належної стабілізації та фільтрації напруги живлення мікроконтролера, обраного із запасом коефіцієнта підсилення аналогового фільтра ФКН, та цифрової корекції функції перетворення ФКН в програмі, виконуваний контролером. Для корекції проводяться калібрувальні вимірювання, за результатами яких визначаються параметри фактичної лінійної залежності між значеннями коефіцієнта заповнення ШІМ та вихідної напруги ФКН.

Реалізація ФКН у прототипі СЗТ після калібрування дозволяє формувати напругу в діапазоні 0,5—7,5 В відносно спільної точки схеми ВВП (що відповідає діапазону від -1,12 до 5,88 В відносно умовного нуля датчиків) з роздільною здатністю не гірше 3 мВ з урахуванням всіх систематичних похибок перетворення.

Запропоновані варіанти ВП (рис. 1) і формувача напруги (рис. 2) дозволяють організувати багатоканальний вимірювальний тракт (чотири диференціальних вимірювальних канали й чотири канали ФКН), використовуючи всього три мікросхеми чотириканальних ОП LM342A і порівняно невелику кількість дискретних пасивних компонентів. В результаті сконструйований прототип СЗТ є достатньо компактним — всі елементи електричної схеми приладу, як цифрової, так і аналогової її частини, розміщуються на одній двосторонній друкованій платі з габаритами 142×75 мм.

Оскільки запропонований алгоритм термокомпенсації передбачає динамічне переключення режимів роботи датчика, динамічні характеристики вимірювального тракту мають чимале значення. Вимоги до цих характеристик визначаються цільовим призначенням приладу, тобто конкретною вимірювальною задачею і зумовленим нею протоколом проведення вимірювань. Динамічні характеристики тракту, в свою чергу, визначаються характеристиками окремих його частин: швидкістю відгуку первинного вимірювального перетворювача (ПВП), частотною характеристикою вторинного перетворювача вихідного сигналу датчика та часом усталення вихідної напруги ФКН.

Як видно зі схеми на рис. 1, постійна часу перетворювача «струм — напруга» в аналоговій частині ВВП дорівнює $R_5 \cdot C_2 = 1,5$ мс. Насправді, однак, в реалізованому прототипі приладу значна частина фільтрації реєстрованого корисного сигналу здійснюється в цифровій частині тракту, після аналого-цифрового перетворення. Програма обробки даних, що виконується центральним контролером СЗТ, містить рекурсивний фільтр низьких частот другого порядку та виконує усереднення з децимацією за 256 відліками.

В результаті гранична частота реєстрації відліків даних складає $\approx 6 \text{ с}^{-1}$.

Розрахунковий час усталення вихідної величини напруги аналогового фільтра ФКН (рис. 2) по рівню 99% від номінального усталеного значення дорівнює $\approx 55 \text{ мс}$, що відповідає граничній частоті зміни напруги $V_s \approx 18 \text{ с}^{-1}$. Беручи до уваги граничну частоту реєстрації відліків вихідного сигналу датчика, можна говорити про частоту переключення режимів роботи датчика в межах $1—4 \text{ с}^{-1}$.

Як видно з наведених оцінок, розглядуваний прилад проектується в розрахунку на відносно повільну динаміку зміни вимірюваних величин. У поточній реалізації прототипу СЗТ розподіл часу між циклами вимірювання активності іонів і вимірювання температури несиметричний — на 16 відліків іонометричного сигналу припадає один відлік термометричного. Таке співвідношення було обране на підставі досвіду попередніх розробок біосенсорних пристроїв, де використовувались аналогічні ІСПТ-датчики. Під час проведення біосенсорного аналізу токсичності виміри активності іонів є по суті статичними — через специфіку протоколу, що передбачає визначення стаціонарних значень зміни активності ферментів в аналізованому розчині відносно контрольного. У випадку використання пропонованих схемних рішень в приладах іншого цільового призначення, із більш жорсткими вимогами до динамічних характеристик ВВП, може знадобитися ревізія елементної бази, а можливо, й більш істотна структурна та схематична модифікація проектного іономера.

Що стосується самого датчика, час усталення первинного відгуку ІСПТ на стрибкоподібну зміну рН становить приблизно 100 мс , але в подальшому, як правило, має місце повільний дрейф електродного потенціалу, характерні значення постійних часу якого можуть складати і одиниці, і десятки годин [5, 6].

Ще одним фактором, про який варто згадати, є вплив складу аналізованого розчину на динаміку відгуку датчика. Пропонований тут спосіб суміщення іонометричної та термометричної функцій є придатним за умови, що при перемиканні в термометричний режим поверхневий потенціал чутливого елемента ІСПТ-датчика залишається незмінним. Це є справедливим для розчинів з високою електропровідністю, де електричне поле в об'ємі розчину практично відсутнє. У високоімпедансних розчинах можуть виникати поляризаційні та дифузійні ефекти, що призводять до затримки відновлення рівня корисного сигналу датчика при перемиканні з термометричного режиму на іонометричний. Докладний розгляд причин і характеру низькочастотних флуктуацій електродного потенціалу ІСПТ виходить за рамки цієї роботи, але хочемо зазначити, що при проектуванні іонометричних пристроїв, орієнтованих на динамічні виміри,

та при характеризації меж похибки вимірювання активності іонів ці явища можуть відігравати значну роль.

На практиці оптимальну для квазісинхронної термокомпенсації частоту перемикавання режимів роботи датчика бажано підбирати експериментально, виходячи з реальних умов застосування іономера.

Експериментальна перевірка ефективності термокомпенсації

Синхронне вимірювання температури зразка та електродного потенціалу дозволяє коригувати температурну залежність корисного сигналу при цифровій обробці отриманих даних вбудованим в іонометричний прилад мікропроцесором. Для ефективної термокомпенсації, однак, необхідно мати адекватну модель термальної чутливості датчика при його роботі в іонометричному режимі, яка б з достатньою точністю відбивала реальну температурну залежність. На практиці на ідеалізовані залежності, наведені в [7] і у вступі до [1], можуть накладатися технологічні й конструктивні фактори, що призводять до відхилення від теоретичних передбачень. Становить інтерес експериментальна оцінка як характеристик реального датчика, так і придатності для компенсації температурної похибки простої лінійної корекції, яка не потребує складних обчислювальних та калібрувальних процедур.

З цієї метою були проведені вимірювання реальних температурних залежностей за допомогою екземпляра ІСПТ-датчика, виготовленого за описаною в [3] технологією. Для вимірювань датчик встановлювався в кювету, заповнену калібрувальним буферним розчином (водний розчин гідрофосфатів натрію та калію) з номінальною величиною рН 7,00. Кювета розміщувалась на платформі магнітної мішалки, вбудований нагрівач якої використовувався для варіювання температури. Для реєстрації температури використовувалась хромель-алюмелева термopара, яка занурювалась безпосередньо у розчин. Для запобігання взаємодії металів термopари з розчином використовувалась поліетиленова ізоляція. Для вимірювання і реєстрації струму датчик підключався до вимірювального перетворювача, побудованого за схемою рис. 1. Величина напруги V_s встановлювалась такою, щоб і в транзисторному (іонометричному), і в діодному (термометричному) режимах роботи датчика початкова величина сили струму в каналі ІСПТ складала близько 500 мкА . Згідно зі знятими з термopари показаннями температура змінювалась в діапазоні $34,9—58,8^\circ\text{C}$ при роботі датчика в діодному режимі та $29,3—43,8^\circ\text{C}$ в транзисторному.

Оскільки сила струму й температура розчину реєструвались окремо, для отримання залежності струму від температури співставлялись записи залежностей цих величин від часу t . При цьому, оскільки інерцій-

ність термопари значно вища, ніж напівпровідникового датчика, при суміщенні записів вводився компенсаційний зсув по осі часу.

Для визначення потрібної величини зсуву знаходили постійну часу τ термопар. Це відбувалося наступним чином. Спочатку фіксувалися значення температури T , вимірювані термопарою після стрибкоподібної зміни температури середовища за різного часу охолодження t . Для цього термопару виймали з нагрітого до $54,8^\circ\text{C}$ розчину і протягом деякого часу витримували на повітрі з температурою $22,1^\circ\text{C}$, при цьому періодично (з інтервалом 1 с) фіксувалися значення температури термопар $T(t)$. Отримані дані використовували для пошуку величини τ , що проводився з застосуванням функції, загальний вигляд якої впливає з відомих законів теплообміну [8, п. 20.2]:

$$T(t) = 54,8 - (54,8 - 22,1) \cdot (1 - \exp(-t/\tau)). \quad (4)$$

Знайдене значення τ склало 13,7 с.

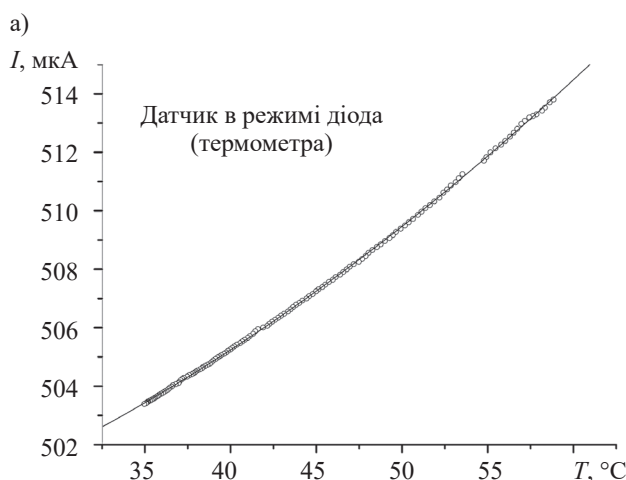
Для суміщення записів часових залежностей струму й температури використовувався відносний зсув на 30 с (що відповідає $\approx 2,2\tau$) з подальшим усередненням значень температури та сили струму на 15-секундних інтервалах. Отримані таким чином залежності $I(T)$ показані в графічному вигляді на **рис. 3**. Перша з них, на **рис. 3, а**, може використовуватись як калібрувальна, що дозволяє надалі вимірювати температуру за допомогою ІСПТ-датчика без додаткового термометра. З рисунка видно, що термометрична функція перетворення реального датчика відхиляється від лінійної, тому для її характеристики використовувалась квадратична регресія. Для розглядуваного прикладу отримані функції прямої залежності i , відповідно, оберненої мають вигляд

$$I(T) = 496,37 + 0,004 \cdot T^2 + 0,06187 \cdot T; \quad (5)$$

$$T(I) = 125 \cdot \sqrt{0,003828 - 0,016 \cdot (496,37 - I)} - 7,7337, \quad (6)$$

де I — струм датчика в мкА;

T — температура в градусах Цельсія.



Середньоквадратичне відхилення (СКВ) експериментальних даних від залежності (4) складає 0,0356 мкА. На підставі цієї величини можна оцінити межі похибки визначення температури за формулою (5), підставляючи до неї значення I з додаванням подвоєного СКВ (що відповідає довірчому інтервалу з імовірністю 0,95). Отримана таким чином оцінка граничної похибки для діапазону температури $29,3\text{—}43,8^\circ\text{C}$, в якому проводились тестові вимірювання в транзисторному режимі, не перевищує $\pm 0,25^\circ\text{C}$.

На **рис. 3, б** крива 2 — залежність струму датчика (в режимі транзистора), відкоригована шляхом ділення на коригувальний коефіцієнт $1 + (T - 25)/298$ (тут T — виміряна температура в градусах Цельсія, 25 та 298 — опорна температура в градусах Цельсія та в Кельвінах відповідно). Суцільними лініями показані межі, що відповідають наведеним вище межах похибки вимірювання температури. Розкид вимірних значень сили струму без компенсації впливу температури складає 24,84 мкА, розкид після компенсації (з урахуванням внеску похибки вимірювання температури) — 2,15 мкА. Таким чином, результати експерименту підтверджують можливість ефективного зменшення абсолютної похибки вимірювань за допомогою простої лінійної корекції.

Як видно з **рис. 3, б**, нахил некомпенсованої температурної залежності датчика в іонметричному режимі становить приблизно 1,5 мкА/К. При типовій струмовій чутливості датчика 30—40 мкА/рН [9, 10] це відповідає величині похибки 0,04—0,05 рН/К. Якщо вважати таку величину похибки вимірювання рН припустимою, то навіть термокомпенсація з помилкою вимірювання температури порядку ± 1 К даватиме позитивний ефект, тобто на практиці, принаймні в деяких випадках, можна використовувати лінійну апроксимацію функції перетворення датчика в термометричному режимі (**рис. 3, а**) і, відповід-

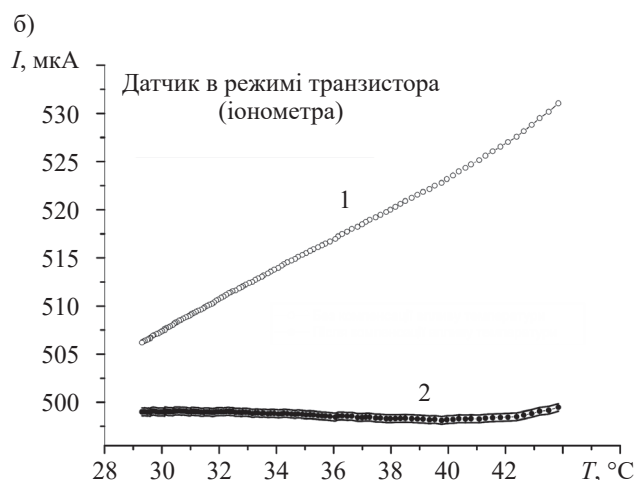


Рис. 3. Залежність струму ІСПТ-датчика від температури в термометричному (а) та іонметричному (б) режимах роботи, отримані без компенсації (1) та після компенсації (2) впливу температури

но, простішу, з обчислювальної точки зору, процедуру корекції впливу температури.

Спостережуване в експерименті збільшення сили струму в каналі ІСПТ зі зростанням температури при роботі датчика в іонометричному режимі та близькість значення коефіцієнта нахилу температурної залежності до величини $1 + \Delta T/T_0$ свідчать про те, що головну роль у температурній залежності відіграє зміна поверхневого електродного потенціалу, але за відносно високих температур, вочевидь, починає проявлятися вплив й інших факторів (тобто температурозалежних процесів, що протікають і в аналізованому розчині, і в напівпровідникових та діелектричних матеріалах чутливого елемента датчика). Проте застосування простої мультиплікативної корекції достатньо для зменшення коливань вимірних значень струму до величини, що відповідає залишковій похибці 0,05—0,07 рН (за вказаних вище типових значень струмової чутливості датчика) в усьому діапазоні задіяних в експерименті температур.

Висновки

Викладені результати макетування елементів вторинного вимірювального перетворювача й експериментальної оцінки характеристик ІСПТ погоджуються з результатами моделювання, представленими в першій частині роботи, і підтверджують перспективність практичної застосовності запропонованих в [1, 3] архітектури перетворювача і способу компенсації впливу температури на функцію перетворення датчиків.

Серед можливих напрямків подальших досліджень, націлених на оптимізацію та вдосконалення запропонованої методики термокомпенсації, слід відзначити такі: більш ретельний аналіз динамічних характеристик вимірювального тракту та визначення меж частоти перемикання режимів функціонування датчика, за якої зберігається ефективна синхронність термометричного й іонометричного сигналів — для розширення сфери застосування методики поза рамки статичних вимірів, а також дослідження стабільності термометричних характеристик датчиків для уточнення протоколів калібрування й покращення алгоритмів використання термометричних даних

в програмі, виконуваний мікроконтролером іономіра. Цим питанням буде приділена увага в ході завершення розробки сигналізатора загальної токсичності.

Автори сподіваються, що застосування запропонованих структурних і схемотехнічних рішень сприятиме подальшому вдосконаленню сучасних іонометричних пристроїв і більш широкому впровадженню твердотільних іонометричних датчиків в лабораторну та виробничу практику.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Павлюченко О. С., Кукла О. Л. Квазісинхронна термокомпенсація в іонометрії з застосуванням ІСПТ. Частина 1: Теорія та моделювання. *Технологія и конструирование в электронной аппаратуре*, №3–4, 2021, с. 36–44. <https://doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.36>
2. <http://www.spectrum-soft.com/> (Дата обращения 10.03.2021)
3. Павлюченко А. С., Кукла А. Л., Голтвянский Ю. В. Применение ионоселективных полевых транзисторов для ферментного анализа токсичных примесей в водных растворах. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2010, № 3, с. 35–46.
4. Кукла О. Л., Павлюченко О. С., Голтвянский Ю. В. та ін. Сенсорні масиви на основі диференціальних ІСПТ-елементів для моніторингу токсичних речовин природного та штучного походження. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, № 2, 2008, с. 58–68.
5. Jung-Lung Chiang, Jung-Chuan Chou, Ying-Chung Chen. Study of the pH-ISFET and EnFET for Biosensor Applications. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 2001, vol. 21, iss. 3, p. 135–146
6. Bousse L., Hafeman D., Tran N. Time-dependence of the chemical response of silicon nitride surfaces. *Sensors and Actuators B*, 1990, vol. 1, iss. 1–6, p. 361–367. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(90\)80231-N](https://doi.org/10.1016/0925-4005(90)80231-N)
7. Gaddour A., Dghais W., Hamdi B., Ben Ali M. Temperature compensation circuit for ISFET sensor. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 2020, vol. 10, iss. 1, 2. <https://doi.org/10.3390/jlpea10010002>
8. Кузьмичев В. Е. *Законы и формулы физики*. Киев, Наукова думка, 1989, 864 с.
9. Кукла А. Л., Лозовой С. В., Павлюченко А. С., Нагибин С. Н. Исследование метрологических параметров датчиков на основе pH-чувствительных полевых транзисторов. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, №2–3, 2013, с. 61–68.
10. Lozovoy S., Kukla A., Pavluchenko A. Investigation of metrological performance of the ISFET-based pH sensors. *Sensors & Transducers (MADICA '12)*, vol. 27, special iss., 2014, p. 225–232.

Дата надходження рукопису
до редакції 29.03 2021 р.

QUASI-SYNCHRONOUS THERMOCOMPENSATION
FOR ISFET-BASED IONOMETRIC DEVICES.

Part 2: Implementation

This paper is a continuation of the previously published work by the same authors, where general principles of the ionometric transducer design utilizing solid-state ion-sensitive electrodes (ion-sensitive field effect transistors, ISFETs) that can simultaneously serve as temperature sensors were laid out. In that part of the work, a possibility of using such transducer as a basis for ionometric device that performs automatic compensation of the temperature dependence of electrode potential without the need for a dedicated thermometric measuring path in the device structure was demonstrated with the circuit simulation results. Combination of the two functions (ionometric and thermometric) in a single sensor is achieved by separating the sensor operation modes in time, and dynamically switching between them by controlling the ISFET bias voltage.

In the present part, a practical implementation of the secondary transducer for ionometric sensors based on ISFET is considered and described. The proposed transducer provides the possibility of programmatic control of the ISFET bias voltage magnitude and polarity, thus allowing to use the ISFET as a temperature sensor. Consecutive switching between ionometric and thermometric modes of sensor operation, along with subsequent algorithmic processing of the obtained data by a microprocessor incorporated into the transducer structure, allows to compensate the temperature dependence of the ISFET electrode potential. Circuit diagrams for the main components of transducer — namely, the programmable voltage source for ISFET biasing and the transimpedance amplifier for the sensor output readout — are presented, as well as the experimental estimation of the ISFET sensor thermometric properties and the efficiency of thermocompensation.

Keywords: ion-selective field-effect transistor (ISFET), ionometry, compensation of temperature dependence, temperature sensor, measuring transducer.

REFERENCES

1. Pavluchenko A. S., Kukla A. L. Quasi-synchronous thermocompensation for ISFET-based ionometric devices. Part 1: Theory and simulation, *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 3–4, pp. 36–44. <https://doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.36> (Ukr)
2. <http://www.spectrum-soft.com/> (Date of access: 10.03.2021)
3. Pavluchenko A. S., Kukla A. L., Goltvjanskyi Yu. V. Application of ion-selective field-effect transistors for enzyme assay of toxic admixtures in aqueous solutions. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2010, no. 3, pp. 35–46. (Rus)
4. Kukla A. L., Pavluchenko A. S., Goltvjanskyi Yu. V. et al. Sensor arrays based on the differential isfet elements for monitoring of toxic substances of natural and artificial origin. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2008, no. 2, pp. 58–68.
5. Jung-Lung Chiang, Jung-Chuan Chou, Ying-Chung Chen. Study of the pH-ISFET and EnFET for Biosensor Applications. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 2001, vol. 21, iss. 3, pp. 135–146.
6. Bousse L., Hafeman D., Tran N. Time-dependence of the chemical response of silicon nitride surfaces. *Sensors and Actuators B*, 1990, vol. 1, iss. 1–6, pp. 361–367. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(90\)80231-N](https://doi.org/10.1016/0925-4005(90)80231-N)
7. Gaddour A., Dghais W., Hamdi B., Ben Ali M. Temperature compensation circuit for ISFET sensor. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 2020, vol. 10, iss. 1, 2. <https://doi.org/10.3390/jlpea10010002>
8. Kuz'michev V. Ye. *Zakony i formuly fiziki* [Physics laws and formulae]. Kyiv, Naukova dumka, 1989, 864 p.
9. Pavluchenko A. S., Kukla A. L., Nagibin S. M. Investigation of metrological parameters of sensors based on the pH-sensitive field effect transistors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no. 2–3, pp. 61–68. (Rus)
10. Lozovoy S., Kukla A., Pavluchenko A. Investigation of metrological performance of the ISFET-based pH sensors. *Sensors & Transducers (MADICA '12)*, vol. 27, special iss., 2014, pp. 225–232.

Опис статті для цитування:

Павлюченко О. С., Кукла О. Л. Квасисинхронна термокомпенсація в іонометрії із застосуванням ІСПТ. Частина 2: Практична реалізація. Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2021, № 5–6, с. 3–10. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.03>

Cite the article as:

Pavluchenko A. S., Kukla A. L. Quasi-synchronous thermocompensation for ISFET-based ionometric devices. Part 2: Implementation. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 3–10. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.03>

A. SEMENOV, D. LUBOV

Ukraine, Kharkiv, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

E-mail: savladi@ukr.net

A NEW APPROACH TO INCREASING THE SENSITIVITY OF A GAS SENSOR BASED ON NANOCRYSTALLINE SILICON CARBIDE FILMS

It was shown the possibility of increasing the sensitivity of a gas sensor based on nanocrystalline SiC films by using a scheme of a two-component sensing element, one of which is an n-nc-SiC film with electronic conductivity, and the second is an p-nc-SiC film with hole conductivity. It is shown that due to the opposite polarity of changes in resistance in the films under the simultaneous action of gases, the difference in relative resistance changes Δ in the n-nc-SiC and p-nc-SiC films will always be greater than in each film separately. The expediency of using a two-component sensing element of a gas sensor based on nc-SiC films with electron and hole conduction is shown.

Keywords: nanocrystalline SiC films, gas sensor, gas sensitivity, electronic conductivity, hole conductivity.

Recently, the problem of global monitoring of technogenic and natural gas pollution of the Earth's atmosphere has become more and more urgent. Particular harm and danger to human health are aggressive (hydrogen sulfide, carbon dioxide, hydrogen fluoride, nitrogen oxides, etc.), toxic (sulfur dioxide, carbon monoxide, hydrogen sulfide, etc.), fire-explosive (methanol, ammonia, methanol, etc.) gas emissions into the atmosphere. The analysis of such gas contaminants requires the development of new gas sensors with fast response and recovery, with the possibility of long-term operation in extreme conditions. This line of research is very relevant because gas sensors are the most important components of advanced communication technologies: Internet of Things, cloud computing, etc. [1].

In recent decades, semiconductor gas sensors based on a wide range of materials (metal oxides [2, 3], graphene [4, 5], polymers [6, 7]) have become widespread due to their good manufacturability, excellent design possibilities, and low cost. However, the relatively long response/recovery times and the lack of reliable operation at high temperatures and in corrosive environments severely limits their use in the future. Additional requirements for the stability of sensors under the influence of intense radiation and electromagnetic fields also sharply raise the problem of finding new functional semiconductor materials for the creation of highly sensitive gas sensors that slightly change their properties under severe external influences.

One of the promising materials with chemical inertness, resistance to radiation effects, and temporary

stability of properties are materials based on a wide-gap third-generation semiconductor SiC [8]. High rates of charge transfer in SiC ensure the fabrication of gas sensors with short response/recovery times [9]. Studies of the properties of SiC sensors have shown that SiC materials are the best candidates for gas sensors for operation in extreme conditions [9–11]. Recent studies have shown that nanostructured SiC materials, at a lower cost, exhibit high stability of properties and increased gas sensitivity in comparison with bulk materials, due to a significantly larger surface area of interaction with the analyzed gas [12, 13].

Particular attention is attracted by films of nanocrystalline SiC (nc-SiC) obtained by direct ion deposition [14], which contain more than 80% of SiC nanocrystals in volume. This significantly exceeds the volumetric content of SiC nanocrystals in nanostructured materials obtained by the traditional method of grinding SiC polycrystals in a ball mill [12] or by the PECVD method [13]. The authors of this work have studied the electrophysical properties of nc-SiC films [15], the gas-sensitive properties of the films to reducing and oxidizing gases [16], the effect of the structure and type of conductivity of the films on their gas-sensitive properties [17]. As a result of the performed studies, the optimal structure and type of conductivity of the films were determined for the manifestation of the maximum gas sensitivity of nc-SiC to oxidizing and reducing gases. However, the problem of improving the characteristics of gas-sensitive materials is constantly in the center of the attention of all sensor developers, including authors.

The aim of this work is to study the possibility of increasing the sensitivity of sensors based on nc-SiC by simultaneously including films with different types of conductivity in the measuring circuit.

Experiment

Samples of nc-SiC films with different types of conductivity were obtained by direct ion deposition due to the ability of SiC to self-doping. Silicon carbide is a unique semiconductor in terms of the ability to change the type of conductivity with a small mismatch in stoichiometry, that is, to exhibit self-doping. An excess of Si in SiC leads to donor doping, i.e. to electronic conductivity. An excess of C in SiC creates acceptor centers and leads to hole conduction [18, 19]. The processes of controlled stoichiometry for self-doping were implemented under nonequilibrium conditions during the deposition of carbon and silicon ions with an energy of ~ 100 eV by the method of direct ion deposition [14].

An excess of silicon or carbon in the films was provided during deposition by changing the composition of the ion flux [20]. Using the capabilities of this method for self-doping, two series of nc-SiC films of a mixture of cubic and rhombohedral polytypes with different types of conductivity were prepared on sapphire substrates [17]. One series of films, designated *n*-nc-SiC, had electronic conductivity. Another series of films, *p*-nc-SiC, had hole conductivity. The deviation of stoichiometry in the SiC films samples was 5–10% for both silicon and carbon. However, we did not investigate the levels of doping as part of the excess elements was deposited in the intercrystalline space. It is known from the literature that the maximum limit of non-stoichiometry in silicon carbide is 1–2% [21]. The type of conductivity in the films was determined from the sign of the Seebeck thermoelectric coefficient using a thermal probe [22]. In this case, the concentration of charge carriers was not measured.

At the same time, under the conditions of preparation, samples of films with close resistances (~ 100 M Ω) were prepared at the same thicknesses and contact areas in order to provide close concentrations of charge carriers.

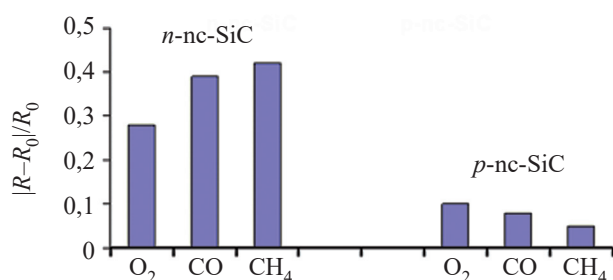


Fig. 1. Gas sensitivity of *n*-nc-SiC and *p*-nc-SiC films to oxidizing (O₂, O₃) and reducing (CH₄, CO) gases [17]

In [17], we measured the gas sensitivity of *n*-nc-SiC and *p*-nc-SiC films to oxidizing (O₂, O₃) and reducing (CH₄, CO) gases and found that *n*-nc-SiC films with electronic conductivity provide for all gases a significantly greater response than *p*-nc-SiC films, which is reflected in the diagram in Fig. 1.

Similar results are known for other semiconductors with hole conductivity [23, 24]. The lower speed and magnitude of the response in *p*-semiconductors is explained by differences in the mechanisms and kinetics of electron and hole conductivities in semiconductors. For example, the mobility of holes in all SiC polytypes is an order of magnitude less than the mobility of electrons [25, 26]. The advantage of semiconductors with electronic conductivity in the magnitude of the response to reactions with gas molecules is clearly confirmed by the fact that the overwhelming majority of semiconductor sensors are based on *n*-semiconductors [25]. Also, a significant factor is the more accessible technologies for doping semiconductors with donor impurities. The prepared samples of both series of nc-SiC films had a thickness in the range of 100–200 nm, rectangular Au/Ni contact pads with an area of 5×3 mm with a distance of 2 mm between them. The initial resistance of the samples was in the range of 100–120 M Ω . Both series of nc-SiC films on sapphire substrates were exposed to gases simultaneously in one chamber. The measurement scheme is shown in Fig. 2. The working temperature of the samples was 500°C. When measuring ozone, the working temperature was 280°C [26]. The samples were exposed to interaction with oxidizing O₂, O₃ and reducing CO, CH₄ gases in concentration ranges, the lower limits of which are accepted in many countries as critical for human health and life: O₂ — 5%, O₃ — 0.1 mg/m³, CO — 0.04%, CH₄ — 10% [27].

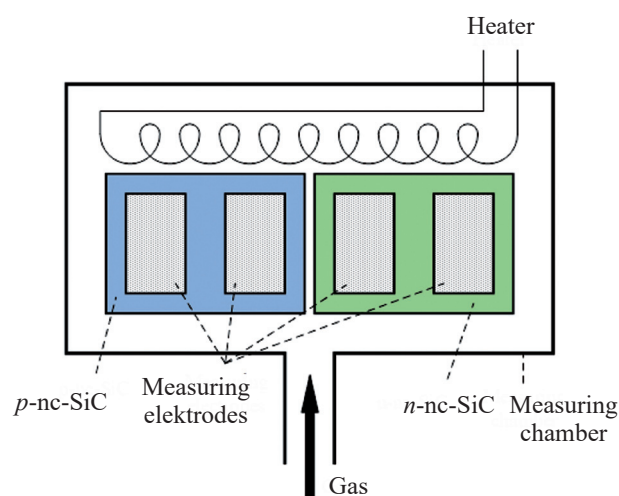


Fig. 2. Diagram of the measuring cell of a gas atmosphere sensor with two sensitive components based on nc-SiC films with *n*- and *p*-conductivity

Results and discussion

Fig. 3 show the dependences of changes in the relative resistance R/R_0 , where R and R_0 are the resistance after and before the action of the gas, samples of n -nc-SiC and p -nc-SiC films under the action of oxidative O_2 , O_3 and reducing CO , CH_4 gases.

The fundamental influence of chemically active gases on the electrical resistance of semiconductors is well known [26]. Under the action of oxidizing gases, which reduce the concentration of electrons and reduce their mobility, the resistance of a semiconductor with electronic conductivity increases, and in a semiconductor with hole conductivity, the resistance, respectively, decreases. The action of reducing gases is the opposite. Their interaction with a semiconductor with electronic conductivity increases the concentration of electrons and therefore the resistance decreases, and in a semiconductor with hole conductivity, accordingly, the resistance increases. The presented dependences of the relative resistances of n -nc-SiC and p -nc-SiC films under the action of oxidizing O_2 , O_3 , and reducing CO , CH_4 gases fully correspond to the fundamental mechanisms of interaction. The figures show that the relative resistance R/R_0 of n -nc-SiC samples under the action of oxidizing O_2 , O_3 gases becomes greater than 1 and increases with increasing gas concentration. And when nc-SiC films interact with reducing CO , CH_4 gases, the relative resistance R/R_0 becomes less than 1 with a subsequent decrease with the gas concentration.

And in samples of p -nc-SiC films with hole conductivity, the effect of gases on resistance is opposite.

More interesting and useful data calculated from the presented dependencies are shown in the Table. In addition to the numerical values of the relative resistances for each gas concentration of both series of samples, the rows $|\Delta R/R_0|$ (where $\Delta R = R - R_0$) show the changes in relative resistances under the action of gases in percent, which clearly shows the differences in the gas sensitivity of nc-SiC films with electron and hole conductivity. We decided to use the fact that the polarity of changes in the resistances of nc-SiC films with electron and hole conductivity is different. And thus, the difference in the simultaneous change in relative resistance for two nc-SiC films with electron and hole conductivity $(R/R_0)_n - (R/R_0)_p$ will be greater than the change for one sample of any conductivity.

This value is indicated by Δ and is presented in the Table as a percentage. It can be seen that Δ for all the given concentrations is greater, and in some cases substantially greater, than the change in the resistance of any one sample of the film with any conductivity. For critical gas concentrations C_{CR} the excess of Δ was 38% for O_2 ($C_{CR} = 5\%$), 19% for O_3 ($C_{CR} = 0,1 \text{ mg/m}^3$), 30% for CO ($C_{CR} = 0,04\%$), 57% for CH_4 ($C_{CR} = 10\%$).

Thus, the use of the combination of two nc-SiC films with electron and hole conductivity as a gas-sensitive

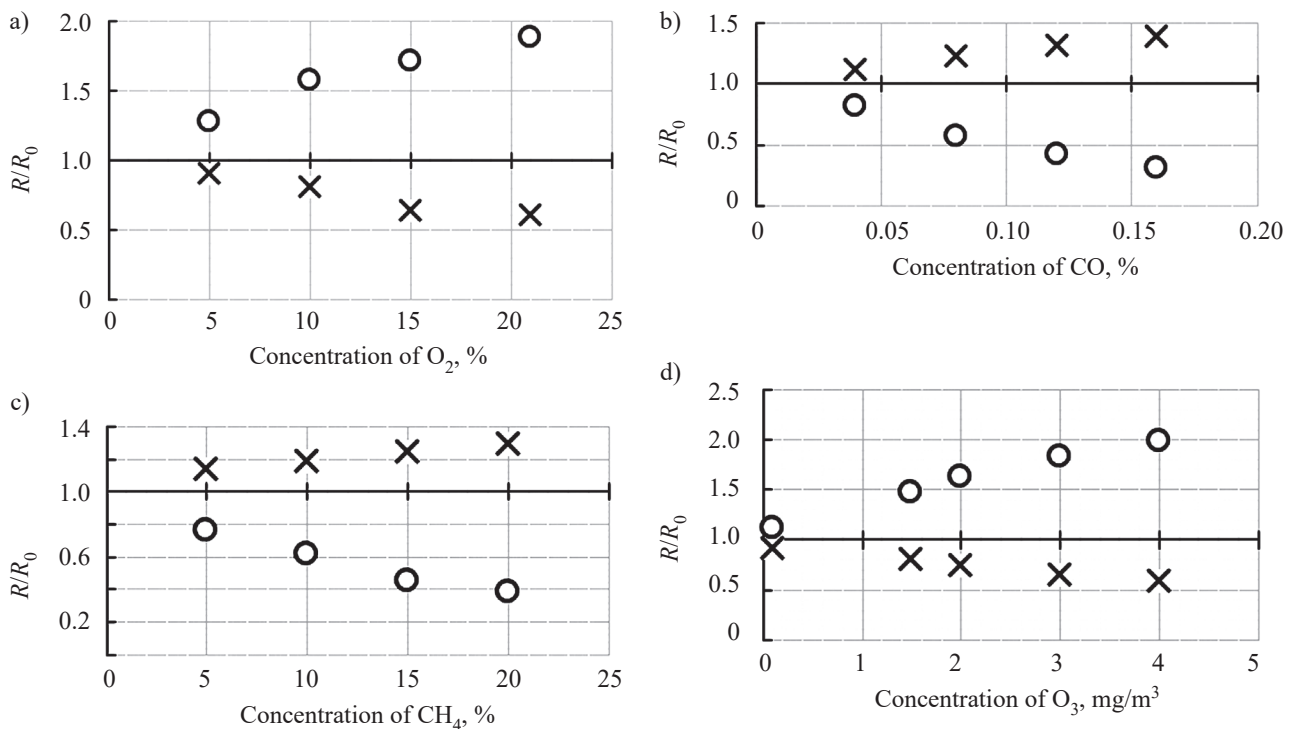


Fig. 3. Dependences of changes in the resistance of nc-SiC films with n - (○) and p - (×) conductivity on the concentration of oxidizing and reducing gases:

$a - O_2$; $b - CO$; $c - CH_4$; $d - O_3$

Dependences of changes in the resistance of nc-SiC films of n- and p-conductivity from the concentration of oxidizing and reducing gases

Parameter		Concentration								
		O ₂ , %				CO, %				
		5	10	15	20	0,04	0,08	0,12	0,16	
n-nc-SiC	R/R_0	1,28	1,57	1,71	1,88	0,82	0,57	0,42	0,31	
	$ \Delta R/R_0 $, %	28	57	71	88	18	43	58	69	
p-nc-SiC	R/R_0	0,9	0,81	0,64	0,61	1,12	1,22	1,31	1,39	
	$ \Delta R/R_0 $, %	10	19	36	39	12	22	31	39	
Δ , %		38	76	107	127	30	65	89	108	
		CH ₄ , %				O ₃ , mg/m ³				
		5	10	15	20	0,1	1,5	2,0	3,0	4,0
n-nc-SiC	R/R_0	0,76	0,62	0,45	0,38	1,11	1,47	1,63	1,83	1,98
	$ \Delta R/R_0 $, %	24	38	55	62	11	47	63	83	98
p-nc-SiC	R/R_0	1,14	1,19	1,24	1,29	0,92	0,81	0,74	0,65	0,59
	$ \Delta R/R_0 $, %	14	19	24	29	8	19	26	35	41
Δ , %		38	57	79	91	19	66	89	118	139

component can provide an increase in the sensitivity of sensors operating under extreme conditions.

Conclusion

The authors have developed a method for increasing the sensitivity of a gas sensor based on nanocrystalline SiC films by using a scheme of a two-component sensitive element, one of which is an n-nc-SiC film with electronic conductivity, and the second is an p-nc-SiC film with hole conductivity. It is shown that due to the opposite polarity of changes in resistance in the films under the simultaneous action of gases, the difference in relative resistance changes Δ in the n-nc-SiC and p-nc-SiC films will always be greater than in each film separately. So for critical gas concentrations, the excess of Δ (%) was 38 for O₂ (5%), 19 for O₃ (0,1 mg/m³), 30 for CO (0,04%), 57 for CH₄ (10%). The authors did not aim to carefully optimize the characteristics of gas-sensitive properties of p-nc-SiC and n-nc-SiC films, but only showed the gain in sensitivity when using a complementary pair of these films for gas analysis. Thus expediency of using a two-component sensing element of a gas sensor based on nc-SiC films with electron and hole conduction is shown. A two-component gas sensor with increased sensitivity based on nc-SiC films can form the basis of a new line of instruments for analyzing aggressive gases in extreme conditions.

REFERENCES

1. Mehmood F., Ahmad S., Kim D.H. Design and implementation of an interworking IoT platform and marketplace in could of things.

Sustainability, 2019, vol. 11, iss. 21, p. 5952. <https://doi.org/10.3390/s11215952>

2. Arafat M., Haseeb A.S.M.A., Akbar S.A. Quadir M.Z. In-situ fabricated gas sensors based on one dimensional core-shell TiO₂-Al₂O₃ nanostructures. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, vol. 238, pp. 972–984. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.07.135>

3. Jaisutti R., Lee M., Kim J. et al. Ultrasensitive room-temperature operable gas sensors using p-type Na: ZnO nanoflowers for diabetes detection. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, vol. 9, iss. 10, pp. 8796–8804. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b00673>

4. Wu J., Tao K., Guo Y. et al. A 3D chemically modified graphene hydrogel for fast, highly sensitive, and selective gas sensor. *Advanced Science*, 2016, vol. 4, iss. 3, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1002/advs.201600319>

5. Song Z., Wei Z., Wang B. et al. Sensitive room-temperature H₂S gas sensors employing SnO₂ quantum wire/reduced graphene oxide nanocomposites. *Chemistry of Materials*, 2016, vol. 28, iss. 4, pp. 1205–1212. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b04850>

6. Hien H.T., Giang H.T., Hieu N.V. et al. Elaboration of Pd-nanoparticle decorated polyaniline films for room temperature NH₃ gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, vol. 249, pp. 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.115>

7. Mun S., Park Y., Lee Y.K., Sung M.M. Highly sensitive ammonia gas sensor based on single-crystal poly(3-hexylthiophene) (P3HT) organic field effect transistor. *Langmuir*, 2017, vol. 33, iss. 47, pp. 13554–13560. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b02466>

8. Capano M.A., Trew R.J. Silicon carbide electronic materials and devices. *MRS Bulletin*, 1997, vol. 22, iss. 3, pp. 19–23. <https://doi.org/10.1557/S0883769400032711>

9. Spetz A.L., Savage S. Advances in SiC field effect gas sensors. In: Choyke W.J., Matsunami H., Pensl G. (eds) *Silicon Carbide. Recent Major Advances*, Germany, Berlin, Springer, 2004, pp. 869–896. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18870-1_36

10. Zolper J.C., Skowronski M. Advances in silicon carbide electronics. *MRS Bulletin*, 2005, vol. 30, iss. 4, pp. 273–278. <https://doi.org/10.1557/mrs2005.73>

11. Neudeck P.G., Okojie R.S., Chen L. High-temperature electronics – a role for wide bandgap semiconductors? *Proceedings of the IEEE*, 2002, vol. 90, iss. 6, pp. 1065–1076. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2002.1021571>

12. Gaiaardoa A., Belluttib P., Fabbria B. et al. Sensing properties of nanocrystalline silicon carbide in wet condition. *17th IMCS University*

of Vienna, 2018, Austria, pp. 612–613. <https://doi.org/10.5162/IMCS2018/P1NM.18>

13. Sultan A., Ahmad S., Mohammad F. A highly sensitive chlorine gas sensor and enhanced thermal DC electrical conductivity from polypyrrole/silicon carbide nanocomposites. *RSC Advances*, 2016, vol. 6, pp. 84200–84208. <https://doi.org/10.1039/C6RA12613H>

14. Semenov A.V., Puzikov V.M., Dobrotvorskaya M.V. et al. Nanocrystalline SiC films prepared by direct deposition of carbon and silicon ions. *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, iss. 10, pp. 2899–2903. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.059>

15. Kozlovskiy A., Semenov A., Skorik S. Electron transport in nanocrystalline SiC films obtained by direct ion deposition. *Superlattices and Microstructures*, 2016, vol. 100, pp. 596–604. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2016.10.013>

16. Semenov A., Kozlovskiy A., Skorik S., Lubov D. Gas sensing properties of nanocrystalline silicon carbide films. *Micro and Nano System Letters*, 2019, vol. 7, iss. 6, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1186/s40486-019-0084-7>

17. Semenov A.V., Lubov D.V., Kozlovskiy A.A. The Chemiresistive properties of SiC nanocrystalline films with different conductivity type. *Journal of Sensors*, 2020, article ID 7587314, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1155/2020/7587314>

18. Taki Y., Kitiwan M., Katsui H., Goto T. Electrical and thermal properties of off-stoichiometric SiC prepared by spark plasma sintering. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2018, vol. 6, iss. 1, pp. 95–101. <https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1446490>

19. Gadzira M., Gnesin G., Mykhaylyk O. et al. Solid solution of carbon in β -SiC. *Materials Letters*, 1998, vol. 35, iss. 5–6, pp. 277–282. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(97\)00263-2](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(97)00263-2)

20. Semenov A.V., Puzikov V.M., Golubova E.P. et al. Low-temperature production of silicon carbide films of different polytypes.

Semiconductors, 2009, vol. 43, iss. 5, pp. 685–689. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782609050273>

21. Birnie, D. P., & Kingery, W. D., The limit of non-stoichiometry in silicon carbide. *Journal of Materials Science*, 1990, vol. 25, iss. 6, pp. 2827–2834. doi:10.1007/bf00584888

22. Platzek D., Karpinski G., Stiewe C. et al. Potential-Seebeck-microprobe (PSM): measuring the spatial resolution of the Seebeck coefficient and the electric potential. *ICT 2005. 24th International Conference on Thermoelectrics*. <https://doi.org/10.1109/ICT.2005.1519875>

23. Cheong K.Y., Silicon carbide (SiC) as non-volatile random access memory (NVRAM) material. *JURUTERA*, 2005, pp. 10–16.

24. Yoon J.W., Kim H.J., Jeong H.M., Lee J.H. Gas sensing characteristics of p-type Cr₂O₃ and Co₃O₄ nanofibers depending on inter-particle connectivity. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, vol. 202, pp. 263–271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2014.05.081>

25. Nikolic M.V., Milovanovic V., Vasiljevic Z.Z., Stamenkovic Z. Semiconductor gas sensors: materials, technology, design, and application. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 22, 6694. <https://doi.org/10.3390/s20226694>

26. George F.F., Leon M.C., Ayo A., Russell B. Metal oxide semiconductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors*, 2010, vol. 10, iss. 6, pp. 5469–5502. <https://doi.org/10.3390/s100605469>

27. Semenov A.V., Lubov D.V., Makhonin M.V., Ozone Sensitive Properties of Thin Films of Nanocrystalline Silicon Carbide. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2020, vol. 12, iss. 5, p. 05016. [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(5\).05016](https://doi.org/10.21272/jnep.12(5).05016)

28. Hall S.A. Airborne contaminants. *Occupational Health Practice*, 1973.

Received 25.08 2021

DOI: 10.15222/TKEA2021.5-6.11
УДК 621.315.592.3

O. B. СЕМЕНОВ, Д. В. ЛЮБОВ

Україна, Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
E-mail: savladi@ukr.net

НОВИЙ ПІДХІД ДО ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ГАЗОВОГО СЕНСОРА НА ОСНОВІ ПЛІВОК НАНОКРИСТАЛІЧНОГО КАРБІДУ КРЕМНІЮ

Останнім часом гостро стоїть проблема пошуку нових функціональних напівпровідникових матеріалів для створення високочутливих газових сенсорів, які слабо змінюють свої властивості в умовах жорстких зовнішніх впливів. Завдання поліпшення характеристик газочутливих матеріалів постійно знаходяться в центрі уваги розробників приладів. Наноструктуровані SiC матеріали, при більш низькій вартості, проявляють високу стабільність властивостей і підвищену газову чутливість в порівнянні з об'ємними SiC матеріалами, завдяки значно більшій площі поверхні взаємодії з аналізованим газом

У роботі досліджено можливість збільшення чутливості газового сенсора на основі плівок нанокристалічного SiC, шляхом використання схеми двох компонентного чутливого елемента, один з яких є плівка n-nc-SiC з електронною провідністю, а другий плівка p-nc-SiC з дірковою провідністю. Завдяки протилежній полярності зміни опору під час дії газу різниця між величинами зміни відносних опорів плівок n-nc-SiC та p-nc-SiC завжди буде більше, ніж у кожній плівці окремо. Встановлено доцільність використання двокомпонентного чутливого елемента газового сенсора на основі плівок nc-SiC з електронною та дірковою провідностями. Двокомпонентний газовий сенсор з підвищеною чутливістю на основі nc-SiC плівок може бути основою лінійки нових приладів для аналізу агресивних газів в екстремальних умовах.

Ключові слова: нанокристалічні плівки SiC, газовий сенсор, чутливість до газу, електронна провідність, діркова провідність.

Опис статті для цитування:

Семенов О. В., Любов Д. В. Новий підхід до підвищення чутливості газового сенсора на основі плівок нанокристалічного карбиду кремнію. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2021, № 5–6, с. 11–15. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.11>

Cite the article as:

Semenov A., Lubov D. A new approach to increasing the sensitivity of a gas sensor based on nanocrystalline silicon carbide films. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 11–15. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.11>

К. т. н. Е. М. ГЛУШЕЧЕНКО

Україна, м. Київ, Науково-виробниче підприємство «Сатурн»

E-mail: gen-nto@ukr.net

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХВИЛЕВОДНО-КОАКСІАЛЬНИХ З'ЄДНУВАЧІВ

Обґрунтовано доцільність використання хвильоводно-коаксіальних з'єднувачів, зазначено їхні основні конструктивні особливості та електричні характеристики, що впливають на аналіз та моделювання антенно-фідерних трактів. Запропоновано метод вимірювання втрат та рівня узгодження таких пристроїв з НВЧ-трактом, а також математичну модель, що їх описує.

Ключові слова: НВЧ, з'єднувач, хвильовід, коаксіал, узгодження, КСХН, втрати, моделювання.

У сучасних складних радіоелектронних системах НВЧ-діапазону — зв'язкових, телекомунікаційних, радіолокаційних — для досягнення поставлених цілей автономними інтегральними елементами антенно-фідерних трактів (АФТ) можуть виступати (особливо в короткохвильовій частині сантиметрового та міліметрового діапазонів) функціональні пристрої, реалізовані на лініях передачі різного типу [1]. З метою об'єднання таких пристроїв один з одним для формування АФТ можуть використовуватися спеціальні з'єднувачі одного з трьох типів: коаксіальні — для з'єднання пристрою одного типорозміру діаметра з іншим, хвильоводні — для з'єднання (стикування) хвильоводів з незбіжними конфігураціями трактів, а також комбіновані НВЧ-пристрої, реалізовані на основі відрізка хвильоводу та коаксіалу.

Основними електричними характеристиками хвильоводно-коаксіальних з'єднувачів (ХКЗ) є втрати, що вносяться пристроєм до АФТ, і узгодження з регулярним НВЧ-трактом (коефіцієнт стоячої хвилі за напруженістю — КСХН або K_{CX}). Інформація щодо них разом з математичною моделлю (хвильові матриці — розсіювання в $[S]$ -параметрах або передачі в $[T]$ -параметрах) дозволяє не тільки виконати аналіз вже існуючих і реалізованих АФТ, а й моделювати НВЧ-тракти радіоелектронних систем, визначитися з компонованням і остаточними електричними параметрами їхніх АФТ.

Вимірювання характеристик з'єднувачів з однотипним каналом (коаксіальних або хвильоводних) реалізується за стандартними методиками за допомогою стандартної апаратури, що має регулярний вимірювальний канал, наприклад за допомогою панорамного вимірювача параметрів НВЧ-кіл. Для дослідження хвильоводних структур застосовуються класичні методики [2], а для досліджень різних модифікацій мініатюрних коаксіальних з'єднувачів найчастіше використовують методики, викладені в [3].

ХКЗ будь-якого типу — це комбіновані НВЧ-чотириполіусники з приєднувальними елементами, що бувають двох типів: приєднувальний фланець фіксованих (залежно від робочої частоти) габаритів (типорозміру) або частина коаксіальної контактної пари з хвильовим опором $Z_0 = 50$ Ом. Відповідно, застосувати стандартну вимірювальну апаратуру для вимірювання характеристик ХКЗ з такими конструктивними особливостями неможливо — для цього необхідна спеціальна метрологічна методика.

Слід зазначити, що в публікаціях, присвячених розробці нових рішень ХКЗ [4, 5], розглядаються тільки особливості їхньої конструкції та характеристики пристроїв без посилань на конкретні методики, які використовувалися авторами для вимірювань. У цій статті запропоновано варіант методики, призначеної для вимірювання характеристик хвильоводно-коаксіальних з'єднувачів.

Конструктивні особливості ХКЗ

У загальному випадку хвильоводно-коаксіальні з'єднувачі являють собою комбінований НВЧ-пристрій, реалізований на основі відрізка регулярного хвильоводу та коаксіального роз'єму. Незалежно від габаритів використовуваних коаксіальних з'єднувачів ХКЗ можуть бути двох типів: співвісно-торцеві або поздовжньо-співвісні (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд ХКЗ: співвісно-торцевого (зліва) і поздовжньо-співвісного (справа)

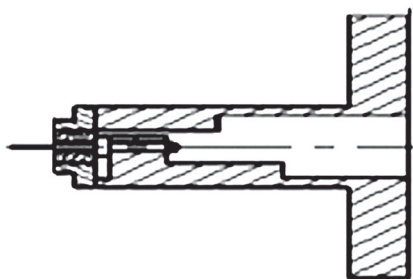


Рис. 2. Поздовжній розріз поздовжньо-співвісного хвильоводно-коаксіального переходу [6]

У кожному з цих ХКЗ здійснюється перетворення електромагнітної хвилі основного типу H_{10} регулярного прямокутного хвильоводу у квазіволну трансверсально-електромагнітного типу (ТЕМ): в співвісно-торцевих ХКЗ в результаті індуктивно-емнісного збудження коаксіал орієнтований перпендикулярно до широкої стінки хвильоводу, а в поздовжньо-співвісних ХКЗ коаксіал розташовується на торцевій стінці відрізка хвильоводу в її геометричному центрі в результаті поступової і послідовної трансформації електромагнітної хвилі вздовж відрізка хвильоводу. Прикладом варіанта поздовжньо-співвісного ХКЗ може служити, наприклад, пристрій, поздовжній розріз якого наведено на рис. 2.

Методики вимірювання основних характеристик ХКЗ

Логічно припустити, що при вимірюванні втрати КСХН тип розглянутих ХКЗ не є принциповим, тому заради зручності зображення структурних схем методику їх вимірювання будемо розглядати на прикладі поздовжньо-співвісних ХКЗ [2].

З [7] відомо, що найбільш достовірним і точним, хоча й достатньо трудомістким, способом вимірювання НВЧ-втрат є метод заміщення, коли вимірюваний НВЧ-пристрій включається в розрив регулярного вимірювального тракту. Оскільки ХКЗ — це пристрій з різнорідними контактними каналами, то вносимі пристроями до НВЧ-тракту втрати доцільно вимірювати не для окремих пристроїв, а для пар ХКЗ, об'єднаних хвильоводним або коаксіальним каналом (рис. 3).

Слід зазначити, що тип об'єднаних в пари ХКЗ вибирається залежно від структури калібрувально-вимірювального каналу застосовуваної апаратури.

Як впливає з [6], за умови хорошого узгодження, у ХКЗ в результаті перетворення типу електромагнітних хвиль в лініях передачі на ділянці з прямокутним хвильоводом і на ділянці коаксіалу з ТЕМ-хвилею амплітуди коефіцієнтів відбиття ідентичні. Тому для визначення рівня втрат α , що вносяться до тракту окремим ХКЗ, представляється допустимим реально виміряні втрати G пари пристроїв розділити надвоє:

$$\alpha \text{ [дБ]} = 0,5G \text{ [дБ]}. \quad (1)$$

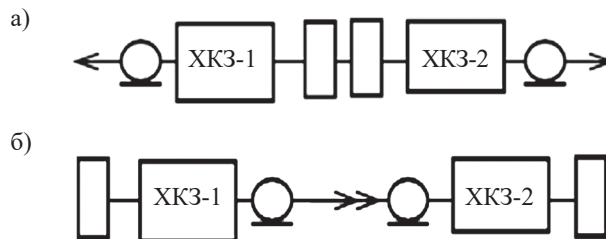


Рис. 3. Структурні схеми пар ХКЗ, об'єднаних хвильоводним (а) та коаксіальним (б) каналом

Складніше оцінити рівень узгодження окремого ХКЗ. Існує два практично застосовуваних методи, які виключають неоднозначність вимірювань НВЧ-параметрів узгодження ХКЗ.

Перший передбачає проведення вимірювань параметрів узгодження одиничного ХКЗ з використанням узгодженого навантаження першого класу ($K_{CX} \leq 1,02$). При цьому, якщо вимірюваний ХКЗ підключається до хвильоводного рефлектометра вимірювальної апаратури за допомогою стандартних фланців, застосовують коаксіальне узгоджене навантаження. Відповідно, якщо ХКЗ підключається до коаксіального рефлектометра, застосовують хвильоводне узгоджене навантаження.

Другий метод передбачає проведення вимірювань НВЧ-параметрів пари ХКЗ, безпосередньо з'єднаних фланцями назустріч один одному (рис. 3, а), з використанням коаксіального узгодженого навантаження. Цей метод аналогічний класичному методу вимірювання параметрів НВЧ-пристроїв — методу заміщення [7]. У випадку з ХКЗ він реалізується в три етапи:

- калібрування вимірювального тракту з підключенням узгодженого навантаження;
- вимірювання НВЧ-параметрів пари з'єднаних фланцями ХКЗ;
- перерахунок вимірюваних параметрів для окремого ХКЗ.

Для експериментально виміряного рівня узгодження пари об'єднаних ХКЗ справедливим є вираз [8]

$$K_{CX}^{\Sigma} = \frac{1 + |\rho^{\Sigma}|}{1 - |\rho^{\Sigma}|}, \quad (2)$$

звідки можна знайти модуль коефіцієнта відбиття системи

$$|\rho^{\Sigma}| = \frac{K_{CX}^{\Sigma} - 1}{K_{CX}^{\Sigma} + 1}. \quad (3)$$

Якщо прийняти, що модуль коефіцієнта відбиття окремого ХКЗ дорівнює половині $|\rho^{\Sigma}|$, тобто

$$|\rho^1| = 0,5 |\rho^{\Sigma}| = 0,5 \cdot \frac{K_{CX}^{\Sigma} - 1}{K_{CX}^{\Sigma} + 1}, \quad (4)$$

то після низки математичних перетворень рівень узгодження окремого ХКЗ з НВЧ-трактом поздовжньо-

співвісного хвильоводно-коаксіального роз'єму можна визначити таким чином:

$$|K_{CX}^I| = \frac{3K_{CX}^{\Sigma} + 1}{K_{CX}^{\Sigma} + 3}. \quad (5)$$

Математична модель ХКЗ

У складних колах з розподіленими постійними, таких як АФТ, змінними величинами, що не залежать від типу ліній передачі, прийнято використовувати падаючі та відбиті потужності, а залежність між падаючими та відбитими від ХКЗ-чотириполосника хвилями визначається хвильовою матрицею розсіювання та її окремими коефіцієнтами:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Діагональні елементи матриці S_{11} та S_{22} — це коефіцієнти відбиття від відповідного плеча, а S_{12} та S_{21} — коефіцієнти передачі, еквівалентні внесеним чотириполосником втрат. Тому в НВЧ-техніці безпосередніми об'єктами вимірювань є коефіцієнти відбиття та передачі пристроїв, при цьому виміри проводяться з узгодженням навантаженням.

ХКЗ будь-якого типу, включно з поздовжньо-співвісними, є взаємними НВЧ-чотириполосниками трансформаторної схеми з нерівномірностями у вигляді змінюваних хвильових опорів (електромагнітної хвилі від хвильоводної моди основного типу H_{10} до ТЕМ-хвилі з хвильовим опором $Z_0 = 50$ Ом).

У загальному випадку строго теоретично математична модель ХКЗ (у вигляді коефіцієнтів $[S]$ -матриці) може бути сформована класичним електродинамічним методом, але це громіздкий, дуже тривалий і коштовний процес. У той же час ХКЗ — це допоміжні елементи НВЧ-тракту, хоча й такі, що істотно впливають на параметри АФТ. Вони мають конкретні й реально вимірювані характеристики — КСХН і втрати. Тому з деяким припущенням можна сформулювати $[S]$ -матрицю такого хвильоводно-коаксіального роз'єму напівемпіричним методом. Тоді матриця розсіювання реалізованого ХКЗ з вимірюваними характеристиками набуває такого вигляду:

$$[S^{ХКЗ}] = \begin{bmatrix} S_{11} = |\rho_1| & S_{12} = e^{-\alpha} \\ S_{21} = e^{-\alpha} & S_{22} = |\rho_1| \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Тут коефіцієнти відбиття сформовані на основі вимірювань і подальших розрахунків відповідно до

виразу (4), а коефіцієнти передачі визначаються вимірним значенням втрат, що вносяться реальним окремим ХКЗ.

Висновки

Наведена методика вимірювання основних електричних характеристик хвильоводно-коаксіальних з'єднувачів, а саме втрат, що вносяться пристроєм до антенно-фідерних трактів, і узгодження з регулярним НВЧ-трактом (коефіцієнт стоячої хвилі за напруженістю), пройшла експериментальну апробацію на низці конкретних пристроїв. При цьому з'єднувачі досліджувалися не тільки в різних частотних діапазонах (хвильоводах типорозмірами від 23×5 до 58×25 мм), але й з різними конструктивними рішеннями коаксіального каналу (типорозмірами $3,5/1,52$; $6,0/2,6$ та $7,0/3,04$ мм).

Багаторазово відтворені результати вимірювань характеристик ХКЗ за запропонованою методикою підтвердили їхню достовірність, що дозволяє рекомендувати її для застосування авторам ініціативних проєктів при створенні сучасних радіотехнічних комплексів — це надасть можливість скоротити терміни розробки та суттєво заощадити кошти.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ-элементов на полосковых линиях. Москва, Сов. радио, 1972, 276 с.
2. Валитов Р.А., Сретенский В.Н. Радиотехнические измерения. Москва, Сов. радио, 1970.
3. Джурицкий К.Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. Москва, Техносфера, 2006, 216 с.
4. Можаровский А.В., Артеменко А.А., Масленников Р.О., Вендик И.Б. Широкополосный волноводно-микрополосковый переход для частотного диапазона 60 ГГц. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019; т. 22, № 4, с. 31–44. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-4-31-44>
5. Можаровский А.В., Сойкин О.В., Артеменко А.А. и др. Широкополосный волноводно-микрополосковый переход зондового типа миллиметрового диапазона длин волн. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019, т. 22, № 5, с. 17–32. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-5-17-32>
6. Глушеченко Е.М. Поздовжньо-співвісний хвильоводно-коаксіальний трансформатор: патент України № 147621. Бюл. № 21, 2021.
7. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах : Справочное руководство. Москва, Физматгиз, 1963, 368 с.
8. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. Москва, Связь, 1971, 388 с.

Дата надходження рукопису
до редакції 10.02 2021 р.

MEASUREMENT METHODS AND MATHEMATICAL MODEL OF MAIN CHARACTERISTICS OF WAVEGUIDE-COAXIAL CONNECTORS

Modern complex microwave radio electronic systems may use functional devices implemented on different types of transmission lines. In order to connect such devices to each other to form antenna feed system, the following three types of special connectors can be used: coaxial, waveguide, and combined microwave devices based on waveguide and coaxial segments.

The main electrical characteristics of waveguide coaxial connectors (WCC) are the losses introduced by the device to the antenna feed and matching with the regular microwave path (voltage standing-wave ratio, VSWR). Standard methods and standard equipment used to measure the characteristics of coaxial or waveguide connectors cannot be applied to WCCs.

This article proposes a method designed to measure the main characteristics of waveguide-coaxial connectors and presents their mathematical model (wave matrices). The proposed methods of measuring microwave characteristic are demonstrated on the example of waveguide coaxial connectors of longitudinal coaxial type.

It should be noted that the proposed technique has been experimentally tested on a number of specific devices. Not only the waveguide coaxial connectors have been studied in different frequency ranges (waveguide sizes from 23×5 to 58×25 mm), but also with different coaxial channel designs (sizes 3.5/1.52; 6.0/2.6 and 7.0/3.04 mm).

The proposed method provides replicable measurements results of the characteristics of waveguide coaxial connectors, which confirms its reliability.

Keywords: microwave, connector, waveguide, coaxial, matching, VSWR, loss, modeling.

REFERENCES

1. Maloratskiy L.G., Yavich L.R. *Proyektirovaniye i raschet SVCH-elementov na poloskovykh liniyakh* [Design and Calculation of Microwave Elements on Strip Lines]. Moscow, Sov. Radio, 1972, 276 p.
2. Valitov R.A., Sretenskiy V.N. *Radiotekhnicheskiye izmereniya* [Radio Engineering Measurements]. Moscow, Sov. Radio, 1970.
3. Dzhurinskiy K.B. *Miniaturnyye koaksial'nyye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCH* [Miniature Coaxial Radio Components for Microwave Microelectronics]. Moscow, Tekhnosfera, 2006, 216 p.
4. Mozharovskiy A.V., Artemenko A.A., Maslennikov R.O., Vendik I.B. Design of wideband waveguide-to-microstrip transition for 60 GHz frequency band. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2019;22(4):31-44. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-4-31-44>
5. Mozharovskiy A.V., Soykin O.V., Artemenko A.A. et al. Wideband waveguide-to-microstrip transition for mm-wave applications. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2019;22(5):17-32. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-5-17-32>
6. Glushechenko E. M. [Longitudinal-Coaxial Waveguide-Coaxial Transformer]. *Patent of Ukraine 147621*, bull. no. 21, 2021.
7. Tisher F. *Tekhnika izmereniy na sverkhvysokikh chastotakh: Spravochnoye rukovodstvo* [Technique of Measurements at Microwave Frequencies: A Reference Guide]. Moscow, Fizmatgiz, 1963, 368 p.
8. Fel'dshteyn A.L., Yavich L.R. *Sintez chetyrekhpolysnikov i vos'mipolysnikov na SVCH* [Synthesis of Four-Terminal and Eight-Terminal Networks at Microwave Frequencies]. Moscow, Svyaz', 1971, 388 c.

Опис статті для цитування:

Глушеченко Е. М. Методи вимірювання та математична модель основних характеристик хвильоводно-коаксимальних з'єднувачів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 5–6, с. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.16>

Cite the article as:

Glushechenko E. M. Measurement methods and mathematical model of main characteristics of waveguide-coaxial connectors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.16>

В. В. ЧМІЛЬ

Україна, м. Київ, Науково-виробниче підприємство «Сатурн»

E-mail: chmil_vladislav@ukr.net

КОНТРОЛЬ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ НВЧ-КАНАЛІВ ПРИЙМАННЯ ТЕЛЕМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗА НЕПРЯМИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Обґрунтовано доцільність і можливість оцінки працездатності НВЧ-каналів систем прийняття телеметричної інформації за непрямыми параметрами. Описано принципи побудови системи контролю параметрів інформаційного каналу НВЧ-приймача за непрямыми параметрами на прикладі її практичної реалізації на радіоастрономічній приймальній системі НВЧ-діапазону пункту приймання телеметричної інформації радіотелескопа РТ-32 С, Х, К Центра космічних досліджень та зв'язку ДКАУ.

Ключові слова: НВЧ-канал, контроль параметрів, непрямі параметри, телеметрія.

Головною задачею при прийманні телеметричної інформації від космічних об'єктів є забезпечення надійності роботи систем, в тому числі систем управління, навіть при виникненні часткової відмови їхніх окремих складових. У зв'язку з цим, важливим є контроль технічного стану систем пункту прийняття інформації, таких як радіоастрономічна приймальна система (РПС), системи частотно-часового забезпечення, зв'язку, накопичення та передачі даних, управління антенним комплексом, енергозабезпечення, підсистеми криогенного охолодження, забезпечення вакуумної складової. Наведені в [1] фундаментальні принципи та вимоги до надійності їх функціонування є актуальними й зараз.

Переважаючою останнім часом тенденцією інтеграції функцій розроблюваної радіоелектронної апаратури з одночасним зменшенням масогабаритних характеристик призводить до її ускладнення та збільшення числа елементів в одиниці об'єму, внаслідок чого стає все важче виявляти несправності окремих компонентів радіоелектронної апаратури без переривання режиму її функціонування. Особливо актуальною такою проблемою є для апаратури НВЧ-діапазону в гібридно-інтегральному та монолітному виконанні. Таке виконання істотно підвищує їхню довговічність, але водночас ускладнює контроль працездатності цих виробів.

Неможливість визначення в процесі функціонування стану елементів складного електронного багатофункціонального НВЧ-пристрою, наприклад приймальної системи радіоастрономічного телескопа, знижує коефіцієнт готовності, а це ускладнює виконання поставленого завдання в процесі його експлуатації. Крім того, важливим фактором

є й витрати на обслуговування радіоелектронної апаратури.

Радіоастрономічні приймальні системи НВЧ-діапазону, як правило, розташовуються безпосередньо поблизу дзеркала антени, тобто знаходяться поза полем дії операторів. Основні їхні особливості повною мірою розглянуті та проаналізовані в [2]. Необхідно зазначити, що традиційні способи контролю НВЧ-параметрів таких систем, запропоновані в [1], потребують застосування громіздкої вимірювальної апаратури, а головне — не забезпечують надійну роботу у складних кліматичних умовах, що в більшості випадків є неприйнятним.

Розв'язати зазначену проблему можна за допомогою методів контролю за непрямыми параметрами. Звідкритих інформаційних джерел відомі деякі методи контролю працездатності апаратури складних систем, наприклад [3], але їх складно адаптувати до використання для систем НВЧ-діапазону. Крім того, відсутні математичні моделі контролю на базі непрямої інформації щодо працездатності та критерії оцінки ефективності систем вбудованого контролю й управління параметрами РПС, що дозволяють проводити комплексну оптимізацію структурних схем з метою підвищення часу напрацювання на відмову в процесі експлуатації.

В цій роботі пропонується ефективна методика контролю працездатності складної системи НВЧ-діапазону за непрямыми параметрами, особливості якої розглядатимуться на прикладі радіоастрономічної приймальної системи НВЧ-діапазону пункту приймання телеметричної інформації радіотелескопа РТ-32 С, Х, К [4] Центру космічних досліджень та зв'язку ДКАУ в м. Золочів Львівської області.

Принципи побудови системи контролю РПС радіотелескопа та формування переліку непрямих параметрів

Типову структурну схему РПС пункту приймання телеметричної інформації з багатоканальною радіоастрономічною приймальною системою наведено на **рис. 1**. У більшості випадків у таких приймальних НВЧ-пристроях особливо важливими параметрами, що регламентуються, є вхідна чутливість (температура шуму $T_{ш}$) і коефіцієнт посилення G_p [1]. Істотне значення має також нерівномірність ΔG коефіцієнта посилення. Допустимим є відхилення температури шуму до 30%, час відновлення у разі виходу блоків з ладу — 3 години.

До числа функціональних блоків РПС, що потребують обов'язкового контролю параметрів для забезпечення працездатності, слід віднести такі:

— кріоелектронний приймальний блок (КПБ);

— блоки перетворення частоти С-, Х- і К-діапазонів (БПЧ-С, Х-, К);
— блоки гетеродинів (БГ);
— блок комутації (БК).

Інформаційний сигнал в такій системі проходить ланцюгами блоків: КПБ С, К — БПЧ-С, -К — БК; ТМШП-Х — БПЧ-Х — БК (ТМШП — термоохолоджувальний малошумлячий підсилювач).

Актуальним завданням є оснащення РПС автоматичною системою контролю працездатності [5, 6], структурна схема якої приведена на **рис. 2**. Слід зазначити, що до кожного блоку, що входить до ланцюжка інформаційного каналу цієї схеми, оснащено платою контролю й управління, яка забезпечує вимірювання застabilізованих непрямих параметрів і передачу результатів на верхній рівень управління для ухвалення рішень. При цьому під непрямыми параметрами слід розуміти такі, від яких залежать основні параметри системи, що забезпечують темпера-

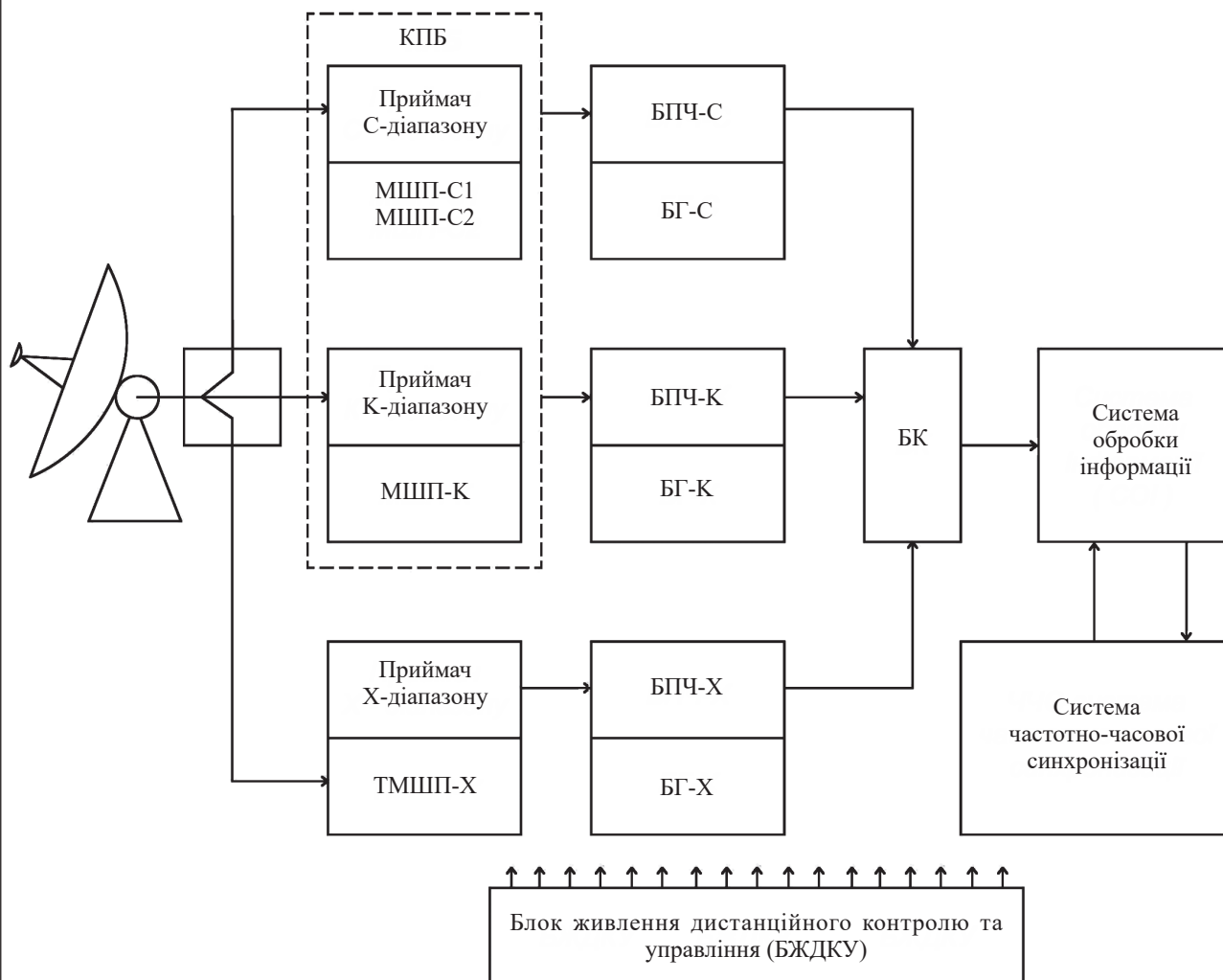


Рис. 1. Типова структурна схема РПС пункту приймання телеметричної інформації

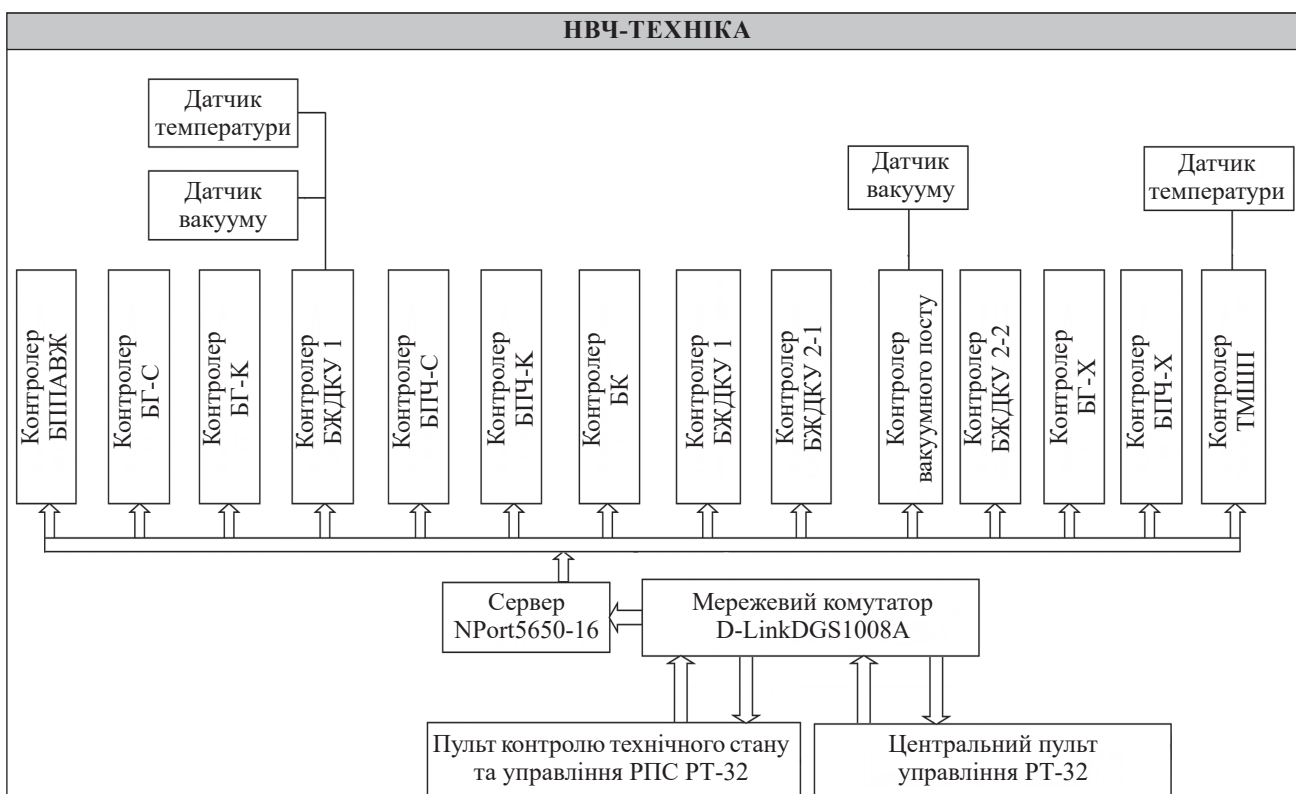


Рис. 2. Структурна схема розподіленої (інформаційної) системи контролю працездатності

турний режим, напругу живлення елементів мікросхем, частотний діапазон тощо.

Практична реалізація контролю працездатності трьохканальної РПС радіотелескопа

В таблиці для прикладу наведено деякі з 60 непрямих параметрів, які суттєво впливають на роботу каналів прийняття телеметричної інформації.

Відповідальність за наявність поточної інформації про стан непрямих параметрів, використовуваних для оцінювання працездатності приймальної системи, практично несе контролер. При цьому для ста-

білізації цих параметрів застосовується стабілізація збурювальних чинників (фізичної температури вузлів, рівня напруги живлення). На рис. 3 показано загальний вигляд контролера блоку перетворення частоти К-діапазону (БПЧ-К).

Плата контролера БПЧ-К призначається для дистанційного управління та контролю основних вузлів БПЧ-К. При цьому основні функції системи діагностики, контролю та управління є такими:

- вимірювання температури термостата БПЧ-К;
- вимірювання температури корпусу БПЧ-К;

Непрямий параметр	Номінальне значення	Залежний основний параметр
КПБ		
Температура криостату	15 К	$T_{ш}$, G , ΔG
Тиск в криостаті	$1 \cdot 10^{-3}$ Па	Напруга живлення вакуумметра
БЖДКУ		
Напруга живлення МШП-С1	4 В	$T_{ш}$, G каналу лівої поляризації С-діапазону
Напруга живлення МШП-С2	4 В	$T_{ш}$, G каналу правої поляризації С-діапазону

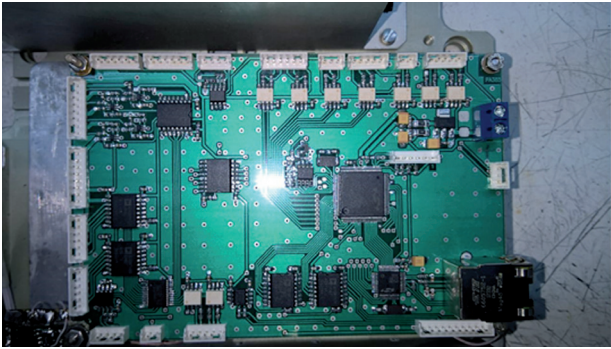


Рис. 3. Загальний вигляд контролера БПЧ-К

- вимірювання струму споживання термобатарей;
- контроль напруги вторинних джерел живлення;
- контроль вихідної потужності та інших основних параметрів синтезаторів і гетеродина;
- управління частотою синтезаторів;
- регулювання коефіцієнта передачі кожного каналу БПЧ-К;
- приймання команд управління та передача інформації про стан параметрів БПЧ-К у відповідь на запит від сервера центрального пульта управління по інтерфейсу ETHERNET або RS-485.

Контролер управління БПЧ-К складається з таких функціональних вузлів:

- мікроконтролер C8051F120;
- контролер ETHERNET CP2201;
- гальванічні розв'язки для контролю параметрів;
- драйвер шини SPI для управління атенюаторами;
- драйвер шини I²C/SMBus для управління перестроюваною частотою синтезаторів;
- зовнішня пам'ять з електричним записом та стиранням інформації (EEPROM);
- стабілізатор напруги;
- інтерфейс послідовного каналу зв'язку RS-485.

Мікроконтролер C8051F120 виконує всі функції управління та контролю згідно з програмою, записаною в його резидентній пам'яті. Високопродуктивне процесорне ядро мікроконтролера має конвеєрну архітектуру. FLASH-пам'ять мікроконтролера складає 128 Кбайт, оперативна — 8448 байт.

Мікроконтролер має апаратно реалізовані послідовні інтерфейси I²C/SMBus, SPI та два універсальні асинхронні приймачі-передавачі, що дозволяє підключати широкий набір периферійних пристроїв.

До складу мікроконтролера входить вісім 8-бітових портів вводу/виводу, які дозволяють організувати роботу по паралельній шині з зовнішньою пам'яттю та іншими мікроконтролерами.

Для організації обміну між мікроконтролером C8051F120 та шиною ETHERNET використано однокристальний ETHERNET-контролер CP2201 (DD1) фірми Silabs.

ETHERNET- контролер CP2201 має наступні властивості:

- інтеграція IEEE 802.3 MAC та 10 BASE-T PHY;
- повністю сумісний з мережами 100/1000 BASE-T;
- повний дуплекс або полудуплекс з автовизначенням;
- автоматичне визначення полярності та виправлення помилок;
- повторна передача в разі колізій;
- генерація CRC-коду;
- підтримка ширококомовної MAC-адресації.

Послідовний канал приймання команд управління і даних від персонального комп'ютера має інтерфейс RS-485 на мікросхемі ADM483AR, вихід якого підключено на вхід RXD-мікроконтролера.

Інформацію про виконання команд та про стан параметрів приймального комплексу мікроконтролер видає через послідовний порт TXD і вихідний буфер інтерфейсу RS-485 до каналу передачі зі швидкістю 115200 біт/с.

Зовнішня пам'ять (EEPROM) на мікросхемі AT24C16C-SSHM-D використовується для зберігання табличних даних, а також різних змінних, які використовуються під час роботи програми управління та контролю контролера управління БПЧ-К. Обмін даними між зовнішньою пам'яттю і мікроконтролером виконується з використанням шини I²C/SMBus. За допомогою шини I²C/SMBus зчитуються цифрові значення температури термобатарей та корпусу блока БПЧ-К, а також струму термобатарей. Для виміру температури використовуються мікросхеми FDT7420, струму термобатарей — мікросхема SI8901.

Приклад оцінки залежності основних параметрів РПС радіотелескопа від непрямих параметрів

Розглянемо у загальному вигляді залежності основних параметрів від непрямих на прикладі нерівномірності коефіцієнта підсилення $\Delta G = G_p - G_{ном}$ (G_p , $G_{ном}$ — реальне та номінальне значення параметра відповідно).

Представимо ΔG у вигляді

$$\Delta G = f(Z_1; Z_2; \dots; Z_i; \dots; Z_n), \quad (1)$$

де Z_i — відмінність i -го параметра ($i = 1, \dots, n$) еквівалентної електричної схеми малошумлячих підсилювачів від ідеального значення у робочому діапазоні частот.

Отримати інформацію про G безперервно в усьому діапазоні надзвичайно важко практично. Про функцію (1) можна говорити лише як про набір з m дискретних точок $\{\Delta G\} = \{\Delta G_1; \Delta G_2; \dots; \Delta G_j; \dots; \Delta G_m\}$, які відповідають частотам з певного набору $\omega_n \leq \omega_1; \omega_2 \dots; \omega_j \dots \omega_m \leq \omega_n$ (ω_n та ω_n — нижня та верхня граничні частоти діапазону).

У цьому разі вираз (1) буде мати вигляд

$$\Delta G_j = f_j(Z_1; Z_2; \dots; Z_i \dots Z_n), \quad (2)$$

де $j = 1, 2, \dots, m$.

Вираз (2) являє собою систему номінальних рівнянь, які можна лінеаризувати в деякій точці $Z_0 = \{Z_{01}; Z_{02}; \dots Z_{0n}\}$, що характеризує набір ідеальних значень параметрів схеми в усьому діапазоні робочих частот. Тоді стан основних параметрів можна представити у вигляді системи рівнянь типу:

$$\begin{aligned} \Delta G_1 &= \Delta G_1(z_0) + a_{11} d_1 + a_{12} d_2 + \dots a_{1i} d_i + \dots + a_{1n} d_n; \\ \Delta G_2 &= \Delta G_2(z_0) + a_{21} d_1 + a_{22} d_2 + \dots a_{2i} d_i + \dots + a_{2n} d_n; \\ &\dots \\ \Delta G_j &= \Delta G_j(z_0) + a_{j1} d_1 + a_{j2} d_2 + \dots a_{ji} d_i + \dots + a_{jn} d_n; \quad (3) \\ &\dots \\ \Delta G_m &= \Delta G_m(z_0) + a_{m1} d_1 + a_{m2} d_2 + \dots a_{mi} d_i + \dots + a_{mn} d_n, \end{aligned}$$

де d_i — різниця між реальним та ідеальним значеннями i -го параметра, $d_i = z_i - z_0$;

$\Delta G_j(z_0)$ — значення функції ΔG_j в точці z_0 ;

a_{ji} — коефіцієнти, що враховують міру впливу непрямого параметра на основний параметр НВЧ-підсилювача (в загальному вигляді є похідною від функцій, що характеризують залежність основного параметра від непрямого).

Аналіз результатів вимірювань показує, що функції, які характеризують залежність основних параметрів від непрямих, у більшості випадків є лінійними або легко можуть апроксимуватися чисельно, що дозволяє зробити машинний аналіз достовірності такого виду контролю, застосувавши метод імітаційного моделювання [7, 8].

Висновки

Запропонована методика контролю та оцінювання стану працездатності складної радіоелектронної системи та основних її характеристик безпосередньо у робочому режимі за допомогою непрямих параме-

трів пройшла експериментальну апробацію та використовується на новому радіотелескопі РТ-32, створеному замість втрачених Україною внаслідок анексії Криму РТ-22 (у Сімеїзі) та РТ-70 (у Євпаторії). Це дозволяє рекомендувати таку методику для використання на складних радіоелектронних системах та системах іншого призначення.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. *Телескопы и радиометры*. Москва, Наука, 1973, 476 с.
2. Глушеченко Э. Н., Пилипенко А. М., Слонин Э. В. и др. Особенности конструктивно-технологических решений приемной системы малых радиотелескопов. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2016, №2–3, с. 21–25. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2016.2-3.21>
3. Пустоваров В. В., Коломійцев О. В., Сачук І. І. та ін. *Мобільна суміщена інформаційно-вимірювальна система. Патент України на корисну модель № 102676*, 2015, бюл. № 21.
4. Антюфеев А. В., Королев А. М., Патока А. Н. и др. Создание радиотелескопа РТ-32 на базе антенной системы MARK-4В. 2. Оценка возможности проведения спектральных наблюдений радиоастрономических объектов. *Радиофизика и радиоастрономия*, 2019, т. 24, № 3, с. 163–183. <https://doi.org/10.15407/rpra24.03.163>
5. Іпатов О. Б., Скресанов В. Н., Іванов Д. В. та ін. Криогенний приймальний фокальний блок для телескопів радіоінтерферометричного комплексу нового покоління. *Радиофизика і радиоастрономія*, 2014, т. 19, № 1.
6. Пилипенко О. М., Сундучков І. К., Чміль В. В. та ін. Радиометрический приемный комплекс и пути снижения вносимой им погрешности в радиометрические измерения. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2015, №5–6, с. 14–21. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2015.5-6.14>
7. Данилевич С. Б., Колесніков С. С., Пальчук Ю. А. Застосування імітаційного моделювання при атестації методик контролю і випробувань. *Вимірювальна техніка*, 2011, №7, с. 70–73.
8. Сундучков І. К., Чміль В. В. Оптимізація структури побудови перетворювального каналу Ка-діапазону з метою мінімізації флуктуаційної похибки НВЧ-каналу радіоприймальної системи малих радіотелескопів. *Тези доповідей 15-ї Української конференції з космічних досліджень*, Україна, м. Одеса, 2015, с. 173.

Дата надходження рукопису
до редакції 20.11 2021 р.

MONITORING THE EFFICIENCY OF MICROWAVE CHANNELS FOR RECEIVING TELEMETRY INFORMATION USING INDIRECT CRITERIA

The paper presents an analysis of existing methods of controlling the efficiency of multipart radio engineering systems and their individual components. The authors consider the situations when traditional methods do not allow controlling the efficiency of the system in operational mode. The study substantiates the practicability and possibility of estimating the efficiency of microwave channels for receiving telemetry information from artificial space objects according to indirect criteria.

The principle of forming a list of indirect control criteria is demonstrated on the example of the functional diagram of the radio receiver system of the RT-32 C, X, K radio telescope. The study formulates the principles of creating a system designed to control the parameters of the information channel of such a microwave radio receiver system by controlling indirect parameters which correspond to the chosen criteria and the list of the basic parameters. A list of indirect parameters affecting the performance of the entire system by controlling the characteristics of its main parameters has been created. The paper carefully considers the problems that arise when equipping the radio receiver system with built-in tools for controlling and managing the indirect parameters. A system of nominal equations is designed for estimating the state of the basic parameters of the components of the radio receiver system. Each of the indirect parameters is codified in digital form. An example of a block diagram of a distributed control and management system for complex radio devices is presented.

The authors determine acceptable deviations for the indirect parameters relative to the nominal values of the direct parameters for controlling the state of both individual devices and the whole multipart system. It is proposed to implement a control and management system of a complex system by using a specialized controller-based circuit board built into each functional device of the radio receiver system. One possible version of such board, its design and all functional units are considered in detail.

The proposed methods of controlling and managing the state of a multipart radio-technical system when receiving telemetric information directly in the working mode has been successfully approved during a series of radio astronomical studies on RT-32 C, X, K radio telescope at the Space Researches and Communications Center of the State Space Agency of Ukraine.

Keywords: microwave channel, parameter control, indirect parameters, telemetry.

REFERENCES

1. Yesepkina N. A., Korol'kov D. V., Pariyskiy Yu. N. *Teleskopy i Radiometriy* [Telescopes and radiometers]. Moscow, Nauka, 1973, 476 p. (Rus)
2. Glushechenko E. M., Pylypenko O. M., Slonin E. V. et al. Features of structural and technological solutions for receiving system of small radio telescopes. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 2–3, pp. 21–25. (Rus) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.2-3.21>
3. Pustovarov V. V., Kolomiitsev O. V., Sachuk I. I. et al. [Mobile combined information and measurement system]. *Patent of Ukraine №102676*, 2015, bull. 21. (Ukr)
4. Antyufeyev A. V., Korolev A. M., Patoka A. N. et al. [Creation of the RT-32 radio telescope based on the MARK-4B antenna system. 2. Evaluation of the possibility of conducting spectral observations of radio astronomical objects]. *Radiofizika i Radioastronomiya*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 163–183. (Rus) <https://doi.org/10.15407/rpra24.03.163>
5. Ipatov O. B., Skresanov V. N., Ivanov D. V. et al. [Cryogenic receiving focal unit for telescopes of the new generation radio interferometric complex]. *Radiofizika i Radioastronomiya*, 2014, vol. 19, no. 1, pp. 81–96. (Ukr)
6. Pylypenko A. M., Sunduchkov I. K., Chmil V. V., Chmil V. M., Yatsyk P. O. [Radiometric receiving complex and ways to reduce the radiometric measurements error]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2015, no. 5–6, pp. 14–21. (Rus) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.5-6.14>
7. Danylevych S. B., Kolyesnikov S. S., Pal'chuk YU. A. [Application of simulation modeling in certification of control and testing techniques]. *Vymiryuvai'na Tekhnika*, 2011, no. 7, pp. 70–73. (Ukr)
8. Sunduchkov I. K., Chmil' V. V. [Optimization of the structure of the Ka-band conversion channel to minimize the functional error of the microwave channel of the radio reception system of small radio telescopes]. *Proceedings of the 15th Ukrainian Conference on Space Research*, Ukraine, Odesa, 2015, pp. 173 (Ukr)

Опис статті для цитування:

Чміл В. В. Контроль працездатності НВЧ-каналів приймання телеметричної інформації за непрямыми критеріями. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 5–6, с. 20–25. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.20>

Cite the article as:

Chmil V. V. Monitoring the efficiency of microwave channels for receiving telemetry information using indirect criteria. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 20–25. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.20>

Д. т. н. Ю. С. ЯМНЕНКО, В. О. ОСОКІН

Україна, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
E-mail: petergerya@yahoo.com; ovo-dez01mp-eds-21@lil.kpi.ua

ПОРІВНЯННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІЮВАННЯ МЕТОДОМ ТРИЛАТЕРАЦІЇ ТА МЕТОДОМ НА БАЗІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Проведено порівняння точності позиціювання мобільного робота при використанні методу, що базується на генетичному алгоритмі і належить до методів штучного інтелекту, та методу трилатерації, який традиційно використовується в задачах позиціювання. Розглянуто застосування відповідної термінології, запозиченої з генетики, та алгоритмів обробки даних для зазначеної предметної області.

Ключові слова: мобільний робот, позиціювання робота, генетичні алгоритми, методи штучного інтелекту, метод трилатерації.

Системи позиціювання живих та штучних об'єктів широко використовуються у технологічних і бізнес-процесах в різних галузях діяльності. Стрімкий розвиток робототехніки, поява та широке впровадження нових побутових та ігрових роботів обумовлюють зростання попиту на нові та вдосконалені пристрої. Для мобільних роботизованих систем задача позиціювання є критично важливою, оскільки є підґрунтям для формування та контролю оптимальної траєкторії руху в режимі реального часу [1, 2].

Області застосування мобільних роботизованих пристроїв охоплюють системи пересування пацієнтів, персоналу та обладнання в лікарнях, контролю місцеперебування робочих, складальних одиниць і інструменту на конвеєрі, виявлення постраждалих під час пожежі, спостереження за поведінкою тварин на вільному випасі з метою виявлення хворих тощо [3]. Різноманітність областей застосування та відносна «молодість» напрямку породили різноманітність технологій позиціонування.

Розрізняють три типи систем позиціювання роботів:

- 1) частково автономні — оператор приймає безпосередню участь у керуванні роботом;
- 2) напівавтономні — робот виконує запрограмовані дії або послідовність дій циклічно (такі роботи використовуються в процесі виготовлення мікросхем, зварювання та інших галузях);
- 3) повністю автономні — ці системи здатні самостійно орієнтуватись у просторі, збирати інформацію з датчиків та приймати рішення щодо виконання дій залежно від параметрів навколишнього середовища.

Останній тип наразі викликає найбільший інтерес дослідників. Для орієнтації у просторі та позиціювання використовуються алгоритми обчислення ко-

ординат на основі методів нечіткої логіки [2], але такі технології мають досить високу вартість і тому застосовуються обмежено. Одним з ефективних рішень є використання алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання [2, 3], зокрема генетичних алгоритмів, для визначення оптимальної траєкторії руху робота. Генетичні алгоритми успішно використовуються для оптимізації параметрів регуляторів при розв'язанні задач маршрутизації мереж, оптимізації інтегральних схем тощо [4—6].

В цій роботі проведено порівняння точності позиціювання мобільного робота, який рухається, представлену на **рис. 1** траєкторією, методом трилатерації та за допомогою генетичних алгоритмів.

Досліджувана система складається з колісної платформи, рух якої здійснюється за допомогою сервомоторів, мікроконтролера та ультразвукових датчиків, розміщених на корпусі робота для виміру відстані до маяків, які розташовуються по периметру й обмежують пересування робота у певному діапазоні. При визначенні координат робота допустимою вважається помилка, величина якої не перевищує половини мінімального з габаритних розмірів робота. На похибку позиціювання впливають такі фактори, як відбиття тестових сигналів, нерівномірність освітлення тощо.

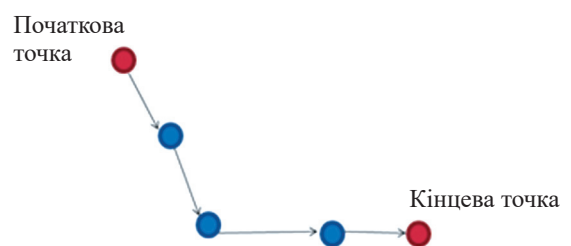


Рис. 1. Задана траєкторія руху робота

Позиціювання методом трилатерації

Розглянемо позиціювання за допомогою методу трилатерації, використовуючи **рис. 2**. Необхідно знайти положення робота на (x, y) -площині з центром координат у місці знаходження приймача O . З геометричної точки зору, завдання трилатерації [7—9] зводиться до знаходження точки перетину трьох сфер на **рис. 2**, центри яких знаходяться у місці розташування приймачів, а радіусами є відстань від приймачів до робота. Якщо відома відстань від робота до приймача, це означає, що робот знаходиться на поверхні відповідної сфери.

Для трьох сфер на **рис. 2** справедлива система рівнянь:

$$\begin{cases} r_1^2 = x^2 + y^2; \\ r_2^2 = (x - i)^2 + y^2; \\ r_3^2 = x^2 + (y - j)^2, \end{cases} \quad (1)$$

де $r_{1,2,3}$ — відстані від робота до приймачів O, X, Y ;
 x, y — координати робота;

i, j — відстані між приймачами, відповідно, X, Y та приймачем O , який знаходиться у центрі координат.

За відомих значень відстаней, які входять до цієї системи рівнянь, можна знайти координати робота:

$$\begin{aligned} x &= \frac{r_1^2 - r_2^2 + i^2}{2i}; \\ y &= \frac{r_1^2 - r_3^2 + j^2}{2j}. \end{aligned} \quad (2)$$

Координати робота, отримані для чотирьох точок його розташування, наведено в **табл. 1**.

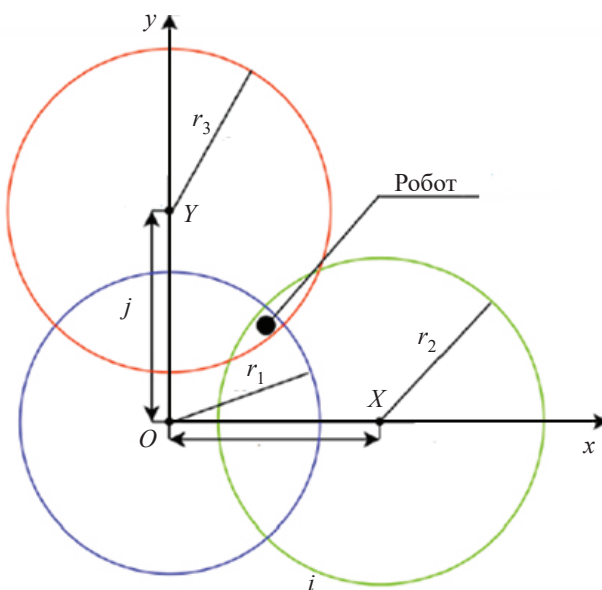


Рис 2. Позиціювання за допомогою методу трилатерації

Таблиця 1

Координати робота, знайдені методом трилатерації

x	y
5,7	5,9
4,3	4,1
3,8	3,5
5,6	5,3

Тепер знайдемо дисперсію вибірки:

$$\begin{aligned} s_x^2 &= \frac{N \sum_{m=1}^N x_m^2 - \left(\sum_{m=1}^N x_m \right)^2}{N(N-1)} = 16,8; \\ s_y^2 &= \frac{N \sum_{m=1}^N y_m^2 - \left(\sum_{m=1}^N y_m \right)^2}{N(N-1)} = 18,18, \end{aligned} \quad (3)$$

де N — кількість вимірювань.

Звідси отримаємо стандартне відхилення вибірки:

$$s_x = 4,09; s_y = 4,26.$$

На практиці метод трилатерації, а також схожі з ним за принципом методи позиціювання є ефективними лише у невеликих приміщеннях. Ефективність їх застосування у відкритому просторі зменшується через такі фактори, як велика кількість даних, значна похибка вимірювань, зовнішні збурення. У таких випадках доцільно використовувати більш гнучкі методи, придатні до прийняття рішень у умовах динамічної зміни навколишнього середовища, серед яких — генетичні алгоритми.

Позиціювання з використанням генетичного алгоритму

В традиційних генетичних алгоритмах розглядається множина векторів можливих рішень, розмірність яких залежить від кількості дискретних моментів часу, коли здійснюється вимірювання деяких фізичних величин.

Пошук напрямку руху мобільного робота реалізується на базі генетичного алгоритму, що передбачає схрещування (комбінування сигналів від датчиків і поточного стану вектора напрямку), селекцію (відбір оптимального напрямку серед множини можливих за певними критеріями) і формування нових поколінь. Таким ітераційним шляхом формується покоління, яке містить рішення, що задовольняють заданому критерію (наприклад, відстані до цільової точки) [10, 11].

Теорія генетичних алгоритмів для розв'язання задач керування у технічних системах оперує поняттями, запозиченими з генетики, такими як [11, 12]:

- *особина* — схема, структура або алгоритм дій технічного об'єкта, які можуть розглядатися як ре-

зультат розв'язання технічної задачі (наприклад, визначення найкращої топології або побудова алгоритму згідно з заданими критеріями);

- *ген* — одна з властивостей (характеристик) особини, що визначається дійсним або бінарним числом; в задачі просторової орієнтації робота генами є його координати на площині;

- *хромосома* (сукупність генів, що визначає індивідуальні властивості особини) — набір чисел, що описує всі характеристики особини, які беруть участь у розв'язанні задачі керування;

- *схрещування* (кросовер) — генетичний оператор над двома хромосомами, що передбачає обмін генами між ними для створення більш пристосованої особини; являє собою комбінування послідовностей чисел;

- *мутація* — генетичний оператор над двома хромосомами, що передбачає заміну стану одного або декількох генів; для двійкової послідовності мутація являє собою інвертування одного чи більше бітів у бітовій послідовності з заданою ймовірністю;

- *інверсія* — генетичний оператор над двома хромосомами, який передбачає, що деяка кількість генів у хромосомі міняється місцями;

- *популяція* (сукупність особин) — множина особин, які беруть участь у розв'язанні технічної задачі;

- *відбір* — обирання групи особин у популяцію за певними умовами.

Функціональна модель системи керування мобільним роботом складається з двох ідентичних обчислювальних структур для керування лівим і правим колесами платформи. На вхід моделі надходять сигнали від датчиків, що фіксують відстань до перешкоди, які підсилюються відповідними ваговими коефіцієнтами (рис. 3). На початку роботи генетичного алгоритму випадковим чином формується сукупність сигналів U_L , яка надходить на вхід генетичного алгоритму:

$$U_L = \sum_{i=1}^{12} l_i w_i, \quad (4)$$

де l_i — відстань до перешкоди;

i — біти генетичного коду, $i = 1, 2, \dots, 12$;

w_i — вагові коефіцієнти.

Для розрахунку початкового положення робота використовуються такі формули:

$$\begin{cases} x_a = v \cdot \cos j; \\ y_a = v \cdot \sin j; \\ \varphi = \omega, \end{cases} \quad (5)$$

де x_a, y_a — координати початкового положення робота;

v, ω — лінійна та кутова швидкість;

φ — кут повороту.

Для оцінки кожної особини першої популяції використовується певний критерій відбору [13, 14]. У

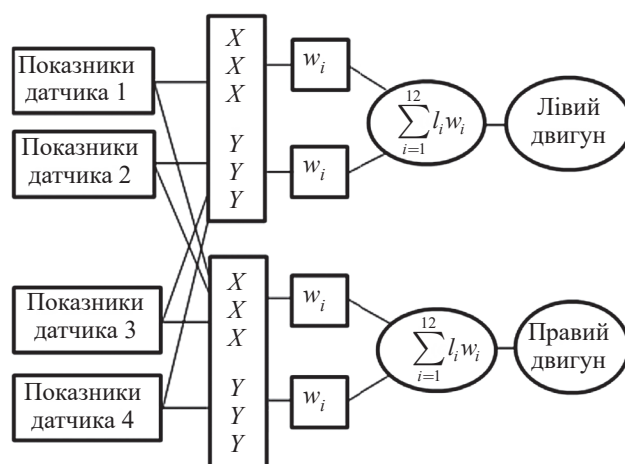


Рис. 3. Модель генетичного алгоритму керування двома колесами робота

нашому випадку це відстань до цілі: що вона більше, то менша ймовірність хромосоми пройти відбір.

Для врахування можливостей одометричних пристроїв (датчиків) для відбору першої популяції формується умова відбору. Вона, наприклад, може бути такою: відстань до об'єкту має лежати у межах від трьох до п'яти метрів, $3 \leq l \leq 5$.

Після відбору формується перша популяція. Кожна особина цієї популяції має відповідну хромосому, в якій зберігаються значення, що входять у заданий діапазон [15]. Розглянемо, наприклад, дві особини, що описуються такими наборами генів x_i :

- перша хромосома: 3,5; 4,2; 4,6; 3,8;
- друга хромосома: 3,7; 4,1; 4,9; 4,3.

Кількість складових особини відповідає кількості орієнтирів. Після генерування першої популяції у ній випадковим чином обираються дві хромосоми, що утворюють «батьківську пару» для формування наступного покоління особин [16, 17]. Пари координат, представлених дійсними числами, кодуються двійковим кодом за формулою

$$g_i = \frac{(x_i - x_{\min}) \cdot (2^m - 1)}{x_{\max} - x_{\min}} + x_{\min}, \quad (6)$$

де g_i, m — i -й кодований ген та розрядність генів у хромосомі відповідно;

x_{\max}, x_{\min} — максимальне та мінімальне значення, які можуть приймати гени у хромосомі.

Тоді для першої хромосоми отримаємо кодовані гени у десятковому та двійковому представленні:

$$g_1 = \frac{(3,5 - 3) \cdot (2^{10} - 1)}{5 - 3} \approx 16383_{10} = 111111111111_2;$$

$$g_2 = \frac{(4,2 - 3) \cdot (2^{10} - 1)}{5 - 3} = 39323_{10} = 1001100110011001_2;$$

Таблиця 2

Вигляд двох закодованих хромосом

I	111111111111	1001100110011001	1100110011001100	110011001100110
II	101100110011001	1000110011001100	11110011001100	1010011001100101

111111111111	1001100110011001	1100110011001100	110011001100110
101100110011001	1000110011001100	11110011001100	1010011001100101

Рис. 4. Схрещування двох хромосом

Таблиця 3

Вигляд утвореної хромосоми (1) та інвертованих при мутації генів (2)

1	111111111111	1001100110011001	1110011001100	1010011001100101
2	111111111111011	1001100110011011	1111011011100	1010010001100101

$$g_3 = \frac{(4,6-3) \cdot (2^{10}-1)}{5-3} = 7372_{10} = 1100110011001100_2;$$

$$g_4 = \frac{(3,8-3) \cdot (2^{10}-1)}{5-3} = 42597_{10} = 110011001100110_2.$$

Аналогічно виконується кодування другої хромосоми.

Вигляд, який мають закодовані хромосоми, показано в **табл. 2**.

Після кодування відбувається схрещування обраних хромосом, яке полягає в обміні генетичною інформацією між ними за схемою, наведеною на **рис. 4**. Після схрещування утворена хромосома підлягає мутації — біти у генетичному коді інвертуються випадковим чином з ймовірністю 0,3 (**табл. 3**).

Після знаходження особини, яка має найвищу пристосованість при заданих ймовірностях схрещування та мутації, відбувається декодування генів хромосом за формулою:

$$x_i = \frac{g_i(x_{\max} - x_{\min})}{2^m - 1} + x_{\min}. \quad (7)$$

де g_i — кодовані гени у десятковому представленні.

Звідси отримаємо декодовані гени:

$$x_1 = \frac{16383(5-3)}{2^{10}-1} + 3 = 3,4;$$

$$x_2 = \frac{39323(5-3)}{2^{10}-1} + 3 = 4,2;$$

$$x_3 = \frac{7372(5-3)}{2^{10}-1} + 3 = 3,2;$$

$$x_4 = \frac{42597(5-3)}{2^{10}-1} + 3 = 4,3.$$

Аналогічним чином генетичні оператори відбору, схрещування та мутації застосовуються до координати у.

Знайдені за генетичним алгоритмом координати чотирьох точок приведено в **табл. 4**. За цими координатами будується граф для знаходження оптимального маршруту до цілі.

Таблиця 4

Координати, знайдені методом генетичного алгоритму

x	y
3,4	4,7
4,2	3,3
3,2	3,8
4,3	4,4

Для того щоб позиціонування здійснювалось більш ефективно, використовується пошук оптимального маршруту за допомогою графу (**рис. 5**). Кожен його вектор описує хромосому генетичного алгоритму [18, 19], а кількість вершин залежить від кількості генів у хромосомі. При кодуванні інформації в одній хромосомі зберігаються можливі маршрути від початкової точки до усіх можливих вершин графу.

Слід зауважити, що побудова графу є одним з інструментів знаходження маршруту за відомими координатами. Методики використання генетичного алгоритму можна поєднувати між собою, тим самим покращуючи кінцевий результат при розв'язанні технічних задач.

На **рис. 6** показано графік залежності максимальної та середньої пристосованості особин від кількості поколінь, за яку буде отримано оптимальне рішення задачі. Для знаходження оптимальної траєкторії руху вирішується задача локального мінімуму, тобто знаходження найменшої кількості поколінь, коли буде досягнуто максимальне значення пристосова-

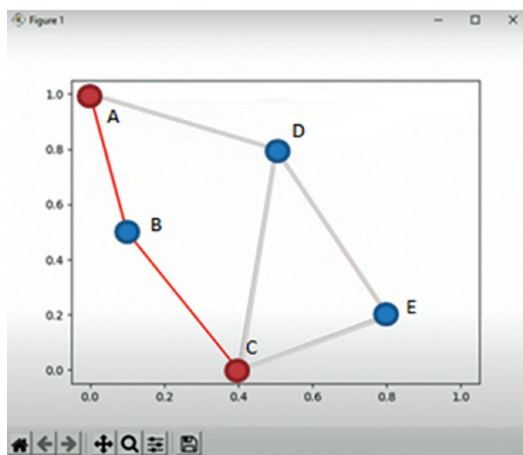


Рис. 5. Можливі маршрути від початкової точки *A* до кінцевої *C*

ності особин. У нашому випадку на 20-му поколінні максимальна пристосованість особин дорівнює 1, середня пристосованість особин дорівнює 0,77, і це є максимальне значення пристосованості із обраних 140 поколінь. Виходячи з цього можна стверджувати, що задача генетичного алгоритму виконана.

Відповідно до формул (3) дисперсія та стандартне відхилення вибірки в цьому випадку складають відповідно

$$s_x^2 = 11,2; s_y^2 = 10,7;$$

$$s_x = 3,34; s_y = 3,27.$$

Аналіз результатів досліджень

Порівняння похибок позиціювання, отриманих при застосуванні двох методів, показує, що використання генетичного алгоритму дає більш точні результати, ніж метод трилатерації: похибка визначення координати *x* складає 3,34 проти 4,09, координати *y* — 3,27 проти 4,26. Це можна пояснити тим, що на позиціювання методом трилатерації впливає багато чинників з навколишнього середовища, а також похибки датчиків, за допомогою яких робот отримує

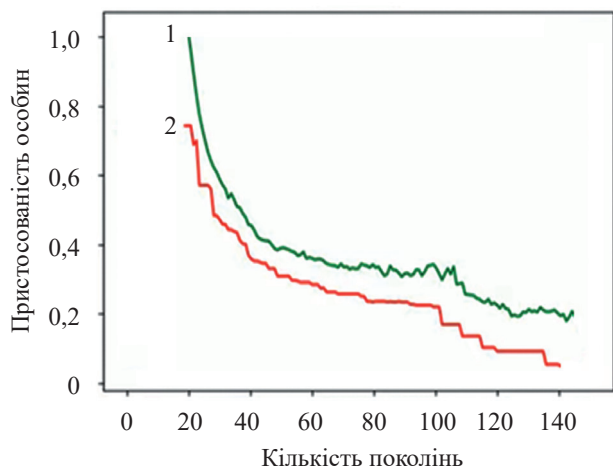


Рис. 6. Залежність максимальної (1) та середньої (2) пристосованості особин від кількості поколінь

інформацію про відстань до приймачів або до поставленої цілі. Пошук координат за генетичним алгоритмом відбувається з використанням кута повороту та лінійної швидкості робота, після чого знайдені координати проходять відбір у першу популяцію. Для генетичного алгоритму головною задачею є знаходження особин з найбільшою пристосованістю при заданій кількості особин у популяції, а також ймовірності генетичних операторів схрещування та мутації.

Висновки

Таким чином, дослідження показали, що за точністю знаходження розташування об'єкта метод трилатерації поступається генетичним алгоритмам, які дозволяють знайти оптимальне рішення задачі позиціювання без суттєвого впливу похибки вимірювань датчиків та інших вимірювальних пристроїв на результат. Завдяки генетичним операторам відбору, схрещування та мутації генетичний алгоритм менше залежить від навколишнього середовища, а також має можливість побудови оптимальної траєкторії руху.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Абабій, В., Судацевський, В., Рошка Н., Лунгу І. Мережа датчиків для керування роботами. *ІІІ МНПК «Прикладні науково-технічні дослідження»*, 2019, т. 6, № 4, с. 26–32.
2. Гладков, Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. *Генетические алгоритмы*. Молдова, Кишинев, Физматлит, 2010, с. 320.
3. Войтюк І. Ф., Дивак М. П., Неміш В. М. Метод та генетичний алгоритм структурної ідентифікації інтервальних різницьових операторів в задачах екологічного моніторингу. *Наукові праці ДонНТУ*, 2011, т. 4, № 4, с. 71–89.
4. Рутковская Д. *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы*. Москва, Горячая линия-Телеком, 2006, с. 452.
5. Юревич Е. И. *Основы робототехники*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2005, 416 с.
6. Лебедев Б. К. Генетический алгоритм распределения соединений по слоям при многослойной глобальной трассировке СБИС. *Известия ЮФУ. Технические науки*. Россия, Таганрог, 2012, № 7, с. 14–22.
7. Здор Г. Н., Потеха А.В. Методические особенности использования генетических алгоритмов для прогнозирования развития пожарных роботов. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка*, 2014, т. 6, № 2, с. 50–56. <https://rep.bntu.by/handle/data/84744>
8. Афанасьев В. Н. *Динамические системы управления с неполной информацией. Алгоритмическое конструирование*. Москва, Ленанд, 2018, с. 216.
9. Герасун В. М., Жога В.В., Несмиянов И.А. и др. Исследование оптимальных конфигураций манипулятора-трипода с поворотным основанием. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2016, № 6, с. 16–21.
10. *3D-печать и устройство 3D-принтера*. <https://make-3d.ru/articles/chto-takoe-3d-pechat/> (20 вересня 2021)
11. Пшихопов В. Х. Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2008, № 2, с. 34–41.
12. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. *Основы управления манипуляционными роботами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004, 480 с.

13. Ульянов С. В. Робастные интеллектуальные системы управления: системный и структурный анализ. *Нечеткие системы и мягкие вычисления*. 2008, № 2, с. 15–31.

14. Рыбаков А. В. Робот-гексапод с нейросетевой системой управления движением. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2017, № 3, с. 59–66.

15. Даринцев О. В., Мигранов А. Б. Система планирования движения группы мобильных микроботов на основе генетических алгоритмов. *Теория и системы управления*, 2007, № 3, с. 163–173.

16. Zhu J., Huai L., Cui R. Research and application of hybrid random selection genetic algorithm. *2017 10th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, 2017, vol. 20, iss. 7, p. 330. <https://doi.org/10.1109/ISCID41719.2017>

17. Croitoru N. High probability mutation and error thresholds in genetic algorithms, *2015 17th International Symposium on Symbolic*

and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC), 2015, vol. 17, iss. 4, p. 271. <https://doi.org/10.1109/SYNASC.2015.51>

18. Kar S., Kabir M. M. J. Comparative analysis of mining fuzzy association rule using genetic algorithm, *2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, 2019, vol. 7, iss. 3, p. 5. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8679336>

19. Chen C., He J., Hong T. A two-stage multi-objective genetic-fuzzy mining algorithm, *2013 IEEE International Workshop on Genetic and Evolutionary Fuzzy Systems (GEFS)*, 2013, vol. 10, iss. 2, p. 16. <https://doi.org/10.1109/GEFS.2013.6601050>

Дата надходження рукопису
до редакції 26.11 2021 р.

DOI: 10.15222/TKEA2021.5-6.26
UDC 004.415.2, 004.588

Yu. S. YAMNENKO, V. O. OSOKIN

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
E-mail: petergerya@yahoo.com; ovo-dez01mp-eds-21@lil.kpi.ua

COMPARISON OF MOBILE ROBOT POSITIONING TECHNIQUES

The article compares the accuracy of mobile robot positioning by the technique based on genetic algorithms, which are related to artificial intelligence, and by the trilateration technique. The authors consider the application of appropriate terminology borrowed from genetics and data processing algorithms for this technical problem. When using the genetic algorithm, the coordinates of the robot are found using angular methods or rigid logic methods, which are not particularly effective because of the large amount of data that is not needed for positioning, so there is a need to select the most likely indicators to find the best route to the target.

The genetic algorithm used in this study first selects the data by a certain criterion to enter the first population, and then the data falls into the beginning of the genetic algorithm. Each individual has chromosomes that represent a sequence of data, i.e., genes. After a chromosome is coded, the following genetic operations are performed: crossing over and mutation. These operations occur cyclically until a population with high fitness is found. The solution is a sequence of selected coordinates, from which a system is constructed to determine the optimal route to the destination.

The robot navigation techniques are compared in terms of coordinate positioning accuracy. Calculation results on dispersion and absolute positioning error show that the positioning using genetic algorithm gives less error than the one using trilateration method. The genetic algorithm allows finding the optimal solution of the positioning problem while reducing a significant influence of the measurement error of sensors and other measuring devices on the result.

Keywords: robot positioning, genetic algorithms, artificial intelligence methods, mobile robot, trilateration method.

REFERENCES

1. Ababii, V., Sudacevschi, V., Rosca N., Lungu I. [Sensors network for robots control]. *International Scientific-Practical Conference "Applied Scientific and Technical Research"*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 26–32. (Ukr)

2. Gladkov, L. A., Kureychik V. V., Kureychik V. M. *Geneticheskiye algoritmy* [Genetic algorithms]. Moldova, Chisinau, Fizmatlit, 2010, 320 p. (Rus)

3. Voytyuk I. F., Dyvak M. P., Nemish V. M. The method and genetic algorithm for structural identification of interval difference operators in the tasks of ecological monitoring. *Scientific Works of DonNTU*, 2011, vol. 4, no. 4, pp. 71–89. (Ukr)

4. Rutkovskaya D. *Neironnyye seti, geneticheskiye algoritmy i nechetkiye sistemy* [Neural Networks, Genetic Algorithms and Fuzzy Systems]. Russia, Moscow, Hot line-Telecom, 2006, 452 p. (Rus)

5. Yurevich Ye. I. *Osnovy robototekhniki* [Fundamentals of Robotics]. St. Petersburg «BHV-Petersburg», 2005, 416 p. (Rus)

6. Lebedev B. K. [Genetic algorithm for the distribution of compounds by layers in multilayer global VLSI tracing.]. *Izvestiya*

SFedU. Engineering Sciences, Russia, Taganrog, Izvestia UFU, 2012, № 7, pp. 14–22. (Rus)

7. Zdor G. N., Potekha A. V. Methodical features of usage of genetic algorithms for prediction of development of fire robots. *Vesnik Hrodzenskaha Dziarzhavnaha Universiteta Imia Ianki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika*. <https://rep.bntu.by/handle/data/84744> (Rus)

8. Afanas'yev V. N. *Dinamicheskiye sistemy upravleniya s nepolnoy informatsiyey. Algoritmicheskoye konstruirovaniye* [Dynamic control systems with incomplete information. Algorithmic design]. Moscow, Lenand, 2018, 216 p. (Rus)

9. Gerasun V. M., Zhoga V. V., Nesmiyanov I. A. et al. [Investigation of the optimal configurations of a manipulator-tripod with a rotary base]. *Mechatronics, Automation, Control*, 2016, no. 6, pp. 16–21. (Rus)

10. [3D printing and 3D printer device]. <https://make-3d.ru/articles/chto-takoe-3d-pechat/> (20 september 2021) (Rus)

11. Pshikhovop V. Kh. Organization of repellers when moving mobile robots in an environment with obstacles. *Mechatronics, Automation, Control*, 2008, no. 2, pp. 34–41. (Rus)

12. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. *Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami* [Fundamentals of manipulation robots control]. Moscow, BMSTU, 2004, 480 p. (Rus)

13. Ulyanov S. V. [Robust intelligent control systems: system and structural analysis]. *Fuzzy Systems and Soft Computing*, 2008, no. 2, pp. 15–41. (Rus)

14. Rybakov A. V. [Hexapod robot with neural network motion control system]. *Robotics and Technical Cybernetics*, 2017, no. 3, pp. 59–66. (Rus)

15. Darintsev O. V., Migranov A. B. [Mobile group traffic planning system microrobots based on genetic algorithms. *Theory and Systems Management*, 2007, no. 3, pp. 163–173. (Rus)

16. Zhu J., Huai L., Cui R. Research and application of hybrid random selection genetic algorithm. *2017 10th International Symposium*

on Computational Intelligence and Design (ISCID), 2017, vol. 20, iss. 7, p. 330. <https://doi.org/10.1109/ISCID41719.2017>

17. Croitoru N. High probability mutation and error thresholds in genetic algorithms, *2015 17th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC)*, 2015, vol. 17, iss. 4, p. 271. <https://doi.org/10.1109/SYNASC.2015.51>

18. Kar S., Kabir M. M. J. Comparative analysis of mining fuzzy association rule using genetic algorithm, *2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, 2019, vol. 7, iss. 3, p. 5. <https://doi.org/10.1109/ECACE.2019.8679336>

19. Chen C., He J., Hong T. A two-stage multi-objective genetic-fuzzy mining algorithm, *2013 IEEE International Workshop on Genetic and Evolutionary Fuzzy Systems (GEFS)*, 2013, vol. 10, iss. 2, p. 16. <https://doi.org/10.1109/GEFS.2013.6601050>

Опис статті для цитування:

Ямненко Ю. С., Осокін В. О. Порівняння точності позиціонування методом трилатерації та методом на базі генетичного алгоритму. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 5–6, с. 26–32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.26>

Cite the article as:

Yamnenko Yu. S., Osokin V. O. Comparison of mobile robot positioning techniques. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 26–32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.26>

НОВІ КНИГИ

НОВІ КНИГИ



Николишин М. Й. Радіотехнічні методи навігації: Навчальний посібник.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020.

Висвітлено основні радіотехнічні методи навігації, які уможливають визначення місцеположення об'єктів та маршрутизацію їх переміщення. Кожна тема супроводжується низкою вправ і задач, які дають змогу закріпити матеріал.

Для студентів спеціальностей 172 “Телекомунікації та радіотехніка”, 173 “Авіоніка”, а також для всіх, хто цікавиться проблемами радіонавігації та радіолокації.



НОВІ КНИГИ



Матвійків М. Д., Васьків Г. М., Вус Б. С., Матвійків С. О. Матеріали для електронних пристроїв.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021.

Викладено основні відомості про матеріали та пов'язані з ними технології, які використовуються в електронній галузі. Розглянуто властивості матеріалів, а також технології та використання матеріалів.

Для студентів закладів вищої освіти, які навчаються за спеціальностями, пов'язаними з використанням матеріалів та технологій, а також для широкого кола читачів, які цікавляться сучасними матеріалами, технологіями та пристроями.



О. С. ПОЛУХІН¹, к. т. н. В. В. КРАВЧИНА²

Україна, м. Запоріжжя, ¹ТОВ «Елемент-Перетворювач»,
м. Миколаїв, ²Миколаївський політехнічний фаховий коледж
E-mail: kravchina_vv@ukr.net

ТЕРМОМІГРАЦІЯ ДОВІЛЬНО ОРІЄНТОВАНИХ РІДКИХ ЛІНІЙНИХ ЗОН Al–Si КРІЗЬ ПЛАСТИНИ КРЕМНІЮ (110)

Проведено пошук умов стабільної міграції лінійних зон крізь кремнієві пластини з орієнтацією (110), дослідження впливу товщини зон, технологічних режимів їх занурення й інших супутніх чинників на стабільність міграції. Проаналізовано причини фасетування лінійних зон і чинники, які дозволяють цього уникнути. Показано, що при виготовленні чипів напівпровідникових структур з великим периметром зі зворотною напругою 2000 В необхідним для створення областей ізоляції в кремнії з орієнтацією, відмінною від (111), є формування ансамблю лінійних зон методом високотемпературного вибіркового примусового змочування, виконання низки вимог до фотошаблону «термоміграція», до процесу занурювання зон за високої температури під час термоміграції. Об'єднання визначених чинників дозволяє проводити стабільну термоміграцію на пластинах кремнію з орієнтацією (110) навіть в стаціонарному полі градієнта температури.

Ключові слова: ізоляція, кристалографічна орієнтація, рідкі лінійні зони Al+Si, силові напівпровідникові прилади, термоміграція, температура.

Застосування термоміграції (ТМ) лінійних зон [1–6] для створення периферійної наскрізної ізоляції відокремлювальних областей (ВО) по периметру кристалів силових напівпровідникових приладів (СНП) виведенням нижнього випрямного високовольтного p – n -переходу на верхню сторону пластини дозволяє формувати чипи з плоскою поверхнею під пайку і односторонньою пасивацією високовольтних випрямних p – n -переходів ВО з величиною напруги електричного пробоя на рівні теоретично можливої [3, 4, 6]. У порівнянні з традиційною двосторонньою дифузійною бору термоміграція дозволяє значно скоротити час створення ВО і зменшити периферійні втрати корисної площі чипів завдяки зменшенню дифузійного розширення цих областей. Електрофізичні властивості створених термоміграцією ВО, на відміну від дифузійних, є однаковими по всій товщині пластини. Технології ТМ є привабливими і постійно удосконалюються [7].

Зазвичай як вихідні використовують пластини кремнію з кристалографічною орієнтацією (111), що забезпечує стабільну міграцію лінійних зон необхідної топології [1, 5, 8, 9] без попередньої орієнтації ліній. Оскільки площа (111) є ретикулярною, а щільність упакування атомів кремнію в ній найвищою, швидкість ТМ для неї — найменша. У пластинах з іншою кристалографічною орієнтацією, (100) та (110), зона ТМ рухається набагато швидше.

Автори висловлюють щиру подяку головному конструкторові ТОВ «Елемент — Перетворювач» А. О. Кириченку за повсякчасну підтримку досліджень.

Для міграції лінійних зон у кремнії з кристалографічною орієнтацією (100) стабільними вважалися тільки два взаємно перпендикулярних напрями: $\langle 011 \rangle$ та $\langle 0\bar{1}1 \rangle$. Лінії, орієнтовані в інших напрямках, фасетувалися (як це й відповідає теорії) в ламану лінію, фрагменти якої були орієнтовані саме в цих напрямках. Це обмежувало можливості розробників чипів, оскільки ВО мали тільки прямокутну форму. Було встановлено [8], що за однакового питомого електроопору на пластинах з орієнтацією (100) досягається більш високий, порівняно з (111), рівень напруги пробоя U_r p – n -переходу ВО. До того ж, периферійні чипи на пластині за рівнем U_r не поступаються чипам, розташованим в центрі пластини. Ця обставина є важливою при виготовленні чипів, що мають порівняно великий периметр і здатні комутувати струм 100–250 А, для яких однорідність і відтворюваність властивостей ВО по площі пластин мають бути максимальними.

Проведення термоміграції на пластинах з орієнтацією (100) дозволяє значно знизити час технологічного процесу через те, що швидкість міграції лінійних зон в цьому випадку є набагато більшою, ніж для кремнію (111) [3, 8]. Додатковими перевагами є значно менший розкид значень швидкості міграції зон різної товщини. Це дозволяє оптимізувати технологічний процес і знизити загальні енергетичні втрати термоміграції. Важливим є також отримання більш рівномірного розподілу електрофізичних властивостей ВО по площі пластин, що є особливо важливим для чипів силових напівпровідникових приладів

з порівняно великим периметром ВО (40—92 мм). Подібні переваги мають бути властивими й для термоміграції на кремнії з орієнтацією (110).

Задачею цієї роботи було дослідження можливостей та характеристик процесу термоміграції на кремнії з орієнтацією (110) і передусім — можливості та умов стабільної міграції лінійних зон.

Огляд літератури

Перші позитивні результати застосування термоміграції довільно орієнтованих лінійних зон на пластинах кремнію (100) були отримані завдяки застосуванню нестационарного температурного поля, де тангенціальна складова градієнта температури ∇T_t змінювалася за напрямком у часі, але середнє значення ∇T_t дорівнювало нулю. Впровадження подібних методик у використання у серійному виробництві СНП устаткування ТМ з резистивним відпадом є досить складним.

Також невіддільним чинником стабільної міграції лінійних зон на пластинах кремнію (100) без попередньої їх орієнтації є застосування технології формування лінійних зон методом вибіркового високотемпературного примусового змочування (ВВЗ) [3, 4, 10].

Світовий досвід ґрунтується на тому, що фасетування зон при термоміграції розпочинається одразу ж після занурення їх у кремній. Також відомо, що у разі розчинення кремнію розплавом зони вплив анізотропії зменшується зі збільшенням температури міграції. Важливу роль має і чинник стартової затримки утворення та занурення зон за наявності плівки власного окислу і включень, що виникають між кремнієм і металом зони, якщо зони створюються за допомогою напилення з наступною фотолітографією. Така плівка є причиною стартової затримки зони й фасетування. При застосуванні ВВЗ такі чинники відсутні, а лінійна зона вже заздалегідь насичена алюмінієм у кількості, що визначається температурою її формування. Тому для розв'язання задачі створення процесу стабільної ТМ на пластинах кремнію (110) є сенс дослідити таку можливість зміни стартових умов, наприклад, шляхом підвищення температури занурення лінійних зон, сформованих ВВЗ.

При дослідженнях стабільної міграції довільно орієнтованих лінійних зон крізь кремній (110) можна вважати, що тут наявні ті ж чинники, що й у разі кремнію (100) [8]. Відмінність полягає в тому, що для кремнію (100) існують два взаємно перпендикулярних напрямки стабільної міграції, а для кремнію (110) — тільки один [1, 2]. Тобто зони будь-якого напрямку фасетуються на паралельні лінійні фрагменти, що на фініші будуть орієнтовані у напрямку стабільної міграції $\{0\bar{1}1\}$.

При дослідженні умов стабільної міграції лінійних зон у кремнії з кристалографічною орієнтацією (100) в стаціонарних умовах було встановлено [8], що

важливими чинниками стабільної міграції неорієнтованих лінійних зон є спосіб формування зон, ВВЗ, та технологічний режим занурення зон. Останній містить в собі температурно-часовий регламент процесу, за якого створюються сприятливі умови для швидкого й одночасного занурення усього ансамблю зон і початку міграції вже зануреної зони після зарощування термоміграційного сліду (область поверхні формування зони та початку процесу ТМ) хоча б на відстань у дві-три товщини зони. Звичайно, важливим чинником є і топологія рисунку шаблону «ТМ» [3, 8]. Складовими рисунку шаблону є захисні, поєднувальні та відокремлювальні області. Саме така конструкція зон забезпечує рівномірну їх міграцію єдиним ансамблем за умови однакової ширини їхніх шарів на поверхні з можливим компенсуючим топологічним їх звуженням в місцях перетину.

Зони, отримані за допомогою розповсюдженої в світі технології — вакуумного напилення товстого шару зоноутворюючого металу-розчинника (зазвичай алюмінію) з наступною фотолітографією [9, 11—13] розпадаються на фасети одразу ж після занурення навіть у разі застосування нестационарного тангенціального теплового поля. Висновки щодо стабільності міграції лінійних зон [1, 2] варто доповнити уточненням — *отриманих напиленням*. Невдовзі після появи статті [8] висновки щодо можливості стабільної міграції неорієнтованих лінійних зон в кремнії з орієнтацією (100) були теоретично обґрунтовані в деяких розрахункових роботах, наприклад [14, 15].

Порівняння особливостей процесів ТМ, досліджуваних в цій роботі, з технологічними аналогами, зазначеними у літературі, вказує на певні відмінності в застосованому обладнанні. Якщо в аналогах зазвичай використовуються газонаповнені установки з одностороннім інфрачервоним нагрівом системою кварцових галогенних ламп [9, 11—13], то в нашому випадку це багатопозиційна вакуумна установка з резистивним нагрівом [3, 4, 8]. Процес за досліджуваною технологією проводиться у вакуумі близько 10^{-4} мм. рт. ст., й алюміній, досягнувши в процесі ТМ фінішної сторони пластини, починає випаровуватися. Завдяки цьому тут відсутні операції з подальшого його вилучення з поверхні, як це має місце у газонаповнених установках. Суттєві відмінності між цими видами обладнання полягають також у величині ∇T , який у вакуумних установках є значно меншим, що дозволяє проводити занурення зон в умовах високих температур. У галогенних установках для цього потрібно на стадії занурення штучно зменшувати величину ∇T , наприклад за допомогою зсувного екрана зі стартової («холодної») сторони пластини. Галогенні установки мають набагато меншу теплову інерцію, і механічний рух пластин відносно ламп або пофазна модуляція потужності ламп дозволяє реалізувати нестационарні теплові умови зміни тангенційної скла-

дової ∇T_r . Стабільність ТМ лінійних зон в нестационарних умовах є набагато вищою.

Стосовно конкретних умов експерименту важливими обставинами є те, що зростання коефіцієнта теплопровідності рідкої фази λ_p стосовно коефіцієнта теплопровідності твердої фази λ_t збільшує нестійкість зони, а також те, що зростання ∇T збільшує нестійкість зони [14, 15]. З підвищенням температури на стартовій поверхні пластин візуально помітно, що лінійні зони спочатку світліші за кремній, потім колір пластини зливається з кольором зон, і нарешті зони стають темнішими. Це може свідчити про те, що λ_p стає меншим (зона з підвищенням температури насичується кремнієм), ніж λ_t , тобто стійкість її має підвищуватися. Хоча зростання температури супроводжується збільшенням ∇T , все одно величина ∇T у вакуумних установках зазвичай є значно меншою, ніж в газонаповнених. Критичною для захисту зон від фасетування є відстань приблизно в три товщини зони [14] — розрахунки свідчать, що саме на цій відстані відбувається еволюція форми зони, і вона в перетині стає такою, в якій і просувається крізь кремній далі.

Матеріали і методи

В роботі було використано технологічні маршрути, описані у [3, 4]. Вихідні пластини кремнію електронного типу провідності діаметром 76 мм з питомим опором 70 і 100 Ом·см спочатку шліфували до товщини 340 мкм. Надалі за стандартним процесом на протилежних сторонах пластин проводилася дифузія Al + B та P. Глибина плоского p - n -переходу складала 60—70 мкм. Слідом на пластині вирощувалася захисна плівка SiO_2 та проводилася фотолітографія ТМ, вікна під лінійні зони ТМ відкривалися на пластинах або з n^+ -, або з p^+ -сторони.

В основному маршруті ТМ використовується метод ВВЗ для формування зон розплавом Al-Si на Si в області вікон SiO_2 . Плівка SiO_2 забезпечує захист робочої поверхні Si від дії розплаву алюмінію. Для формування розплаву використовувався алюміній особливої чистоти A999 (A6N). Досліджувана топологія шару ТМ містить відокремлювальні області, а також поєднувальні та захисні лінійні зони, які в комплексі створюють як рисунок на шаблоні, так і нерозривний об'єднаний ансамбль ТМ при формуванні лінійних зон. Кристали приладів, як правило, мають форму квадрата, по периметру яких створюються ВО у вигляді восьмикутника (квадрата зі зрізаними кутами). Ширину ліній змінювали з метою знаходження оптимальної величини для пластин (110). Зони в перехрестях, наприклад при перетині ВО та об'єднувальних лінійних зон, мають розширення. Відносне збільшення відстані між краями зон може погіршувати процес затягування сліду зони під час занурення, який протікає від країв зони до центру. Внаслідок такої неоднорідності або у разі надто широкої зони в процесі рекристалізації можуть утворю-

ватися порушення у вигляді заглиблень у центрі перехрестя або посередині зони.

Як виявилось із попередніх калібрувальних дослідів, товщина зон має бути близько 20 мкм. Річ у тім, що збільшення товщини призводить не тільки до поліпшення процесу міграції, але й до суттєвого зменшення блокувальної здатності вертикального p - n -переходу ВО, про що свідчать результати замірів U_r [16]. Це спостерігалось як для кремнію з кристаліграфічною орієнтацією поверхні пластин (111), так і (100). Отже, максимально допустимою можна вважати товщину лінійних зон 23—26 мкм.

Для визначення оптимального режиму процесу ТМ досліджувалися зони товщиною 18 та 23 мкм, при цьому на шаблонах формувалися також контрольні зони більшої та меншої товщини. Технологія ТМ складається із двох основних етапів: формування лінійних зон та високотемпературного процесу ТМ. Перший етап формування лінійних зон, в експерименті — ВВЗ, проводився на автоматі формування зон ОН.1878 за температури $T_\phi = 770 \pm 5^\circ\text{C}$ [4]. Досліджувалося два режими з різною температурною дозою D , яка визначається температурою T та часом обробки t в розплаві: $D = Tt$. В нашому експерименті температура була постійною, змінювався час взаємодії пластин з розплавом Al шляхом зміни швидкості рухомого утримувача пластин — шибера. Для зон шириною 18 мкм обирався режим зі стандартним часом. У більш інтенсивному режимі для формування зон шириною 23 мкм час збільшувався на 25%. В цьому режимі збільшується як товщина шару силуміну, утвореного із залученого до поверхні зони Al та розчиненого в ньому Si, так і, відповідно, відносна маса залученого Al.

Після формування зон проводилося селективне травлення та видалення плівки SiO_2 . Потім на установці ОН.1944 з резистивним нагрівом проводився другий етап — процес ТМ: занурення зон і власне міграція. Температура занурення зон у підготовчому процесі дорівнювала 1140°C . Дослідження основних процесів занурення проводилося за температури $1240 \pm 10^\circ\text{C}$. Контроль ТМ структур проводився як візуально, так і за допомогою оптичного мікроскопа Neofot. При стартовому зануренні зон особлива увага приділялась фіксації можливого фасетування з метою його подальшого унеможливлення завдяки коректуванню режиму ТМ.

Для порівняння крім дослідних пластин з орієнтацією (110) тим самим маршрутом проводили також і контрольні пластини з орієнтацією (111). При цьому тривалість другої, високотемпературної стадії обиралася з огляду на час, необхідний для завершення більш повільного процесу ТМ на кремнії (111).

Для порівняння особливостей формування ВО етап формування зон проводився різними методами:

ВВЗ та традиційним вакуумним напиленням алюмінію в канавки (для пластин (111)). Для виготовлення дослідних зразків кристалів використовувалися процеси локального рідинного травлення пластин кремнію в області поверхні зон ТМ за стандартною технологією, описаною в [4, 16]. Для цього після проведення ТМ і формування зон на пластинах (111) виконувалося двостороннє травлення канавок із застосуванням методів фотолітографії в стандартному травнику СР ($\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH} = 1:4:0,5$) протягом 12 хвилин.

Дослідження форми канавок після процесів травлення шарів ВО структур проводилося на електронному автоемісійному мікроскопі SUPRA 40WDS. Фотографії мікрорельєфу поверхні травлення (МІПТ) виконувались в режимі відбитих електронів.

Експеримент

Процес термоміграції проводився за температури $1240 \pm 10^\circ\text{C}$. На декількох пластинах (110) були сформовані зони товщиною 18 мкм, що відповідає товщині зон, які зазвичай використовуються для ТМ на пластинах (100) при створенні чипів СНП: діодів прямої полярності, тиристорів і тріаків [4, 8, 16]. Для пластин (110) зони такої товщини не забезпечували стовідсотково стабільну міграцію. На частині зон спостерігалася фасетування на паралельні прямі відрізки згідно з визнаною теорією. Ці фасетовані фрагменти межували з незануреними фрагментами — тобто порушувалася вимога міграції зон єдиним ансамблем. Незанурені фрагменти, своєю чергою, розташовувалися там, де товщина зон згідно з попередніми замірами була меншою за 15 мкм. При цьому на контрольних пластинах (111) також спостерігалася порушення процесу ТМ у вигляді часткового невиходу зон на фінішну поверхню. Зовнішній вигляд стартової поверхні теж свідчив про те, що там, де зони промігрували стабільно, не змінюючи конфігурації ліній елементів, занурення відбулося без ускладнень на пластинах обох орієнтацій. Через неповне видалення оксидної маски після операції ВВЗ мала місце небажана взаємодія розплаву зони з SiO_2 , в результаті чого утворився помітний слід по краях зон перед зануренням, а також спостерігалися розриви зон і деякі не занурені фрагменти.

Той факт, що на пластинах (110) були фрагменти, де міграція зон проходила стабільно, вказувало на можливість отримання позитивного результату за умови зміни режиму формування і занурення зон. Товщину зон було збільшено, а їх занурення проводилося за температури $1240 \pm 10^\circ\text{C}$.

Контроль термоміграції зон товщиною 23—25 мкм показав, що за час ТМ всі вони промігрували повністю, й алюміній, який по закінченню процесу досягнув фінішної сторони пластин (110), встиг випаритися задовго до завершення високотемпературної стадії міграції на пластинах (111). Дослідження пока-

зали, що товщина зони 23—25 мкм є оптимальною. З даних контролю видно, що занурення ліній відбулося структурно, топологічно вірно, швидко й одночасно за винятком деяких потрійних перехрестів, де однорідність зон порушується внаслідок більшої товщини. В таких місцях спостерігалися характерні поглиблення трикутної форми для пластин (111) і більш складної форми для (110).

Для міграції з використанням високотемпературного ($1240 \pm 10^\circ\text{C}$) режиму занурення зон окрім пластин, що мали зони підвищеної товщини, також було завантажено в камеру декілька пластин з товщиною зон 18 мкм і окремими елементами меншої товщини, а також контрольні пластини з орієнтацією (111). Проведений після ТМ контроль показав, що всі зони оптимальної товщини промігрували повністю, і алюміній встиг випаритися задовго до завершення високотемпературної стадії міграції (її тривалість обирається з огляду на час, необхідний для завершення ТМ на кремнії (111)). Результати досліджень процесів ТМ зведено в **таблицю**.

Особливості процесу ТМ за різної температури занурення зон та їхньої топологічної ширини

Орієнтація, тип провідності стартової поверхні пластин Si	Температура занурення при ТМ, $^\circ\text{C}$	Характеристика зони ТМ товщиною	
		18 мкм	23 мкм
(110), p^+, n^+	1140	Часткове фасетування, незанурення на витонченнях	—
(110), p^+, n^+	1240	Здебільшого стабільна, незанурення на витонченнях	Стабільна
(111) p^+, n^+	1140	Часткове незанурення на витонченнях	Здебільшого стабільна
(111) p^+, n^+	1240		

На зонах зменшеної товщини (<18 мкм) занурення також було успішним, за винятком тих ділянок, де товщина була набагато меншою від оптимальної, там лінії випарилися повністю ще до занурення. Фігури поглиблень в перехрестях також спостерігалися, хоча їхня глибина й ширина були меншими. При цьому найменшу ширину і глибину мали фігури в перехрестях на краях пластин, особливо в місцях перехрещення поєднувальних зон з контурними. Це є ознакою оптимальності як товщини зон і режиму ТМ, так і режиму занурення, що в сукупності забезпечило успішну технологію ТМ на пластинах (110).

Отже, зони товщиною 23—25 мкм на усіх пластинах промігрували повністю, рівномірно, без ви-

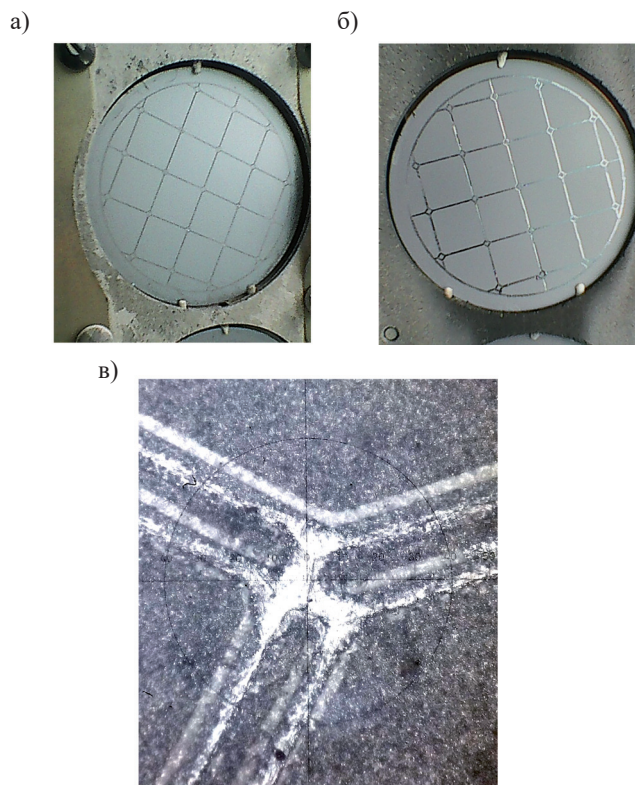


Рис. 1. Пластина (110) в касеті після термоміграції:

a — стартова поверхня; *б* — фінішна поверхня; *в* — збільшене зображення зон в перехресті, де на стартовій поверхні в місцях занурення зон залишилися сліди взаємодії алюмінію з рештками нетравленого діоксиду кремнію, а в місцях локального розширення зон утворюються фігури складної форми

кривлення й фасетування (рис. 1). На стартовій поверхні спостерігалися сліди взаємодії розплаву зон з оксидом по границях зон, проте це не вплинуло на якість процесу ТМ, на відміну від того, що спостерігалося на пластинах (111). На деяких перехрестях, де були завеликі локальні розширення зон, занурення проходило складно, спостерігались утворення мікрорельєфу у вигляді ямок без чіткого огорожування (як це властиво для кремнію (111) і (100)) — у вигляді заокруглених прямокутників. Але в більшості випадків зона усіх складових елементів топологічного шару занурювалася як єдине ціле, одночасно, без утворення рельєфу поглиблень. Треба відмітити, що на тих самих пластинах, де були ямки в перехрестях, були і перехрестя без ямок. Ямки відповідали місцям, де на шаблоні були надмірні локальні розширення ліній в перехрестях. Тож оптимальний режим занурення відзначається й оптимальним рельєфом поверхні рекристалізації після занурення зон. У порівнянні з кремнієм (111) швидкість міграції лінійних зон крізь кремній (110), вочевидь, є вищою (приблизно на 50%). Результати ТМ також показали, що на якість занурення не впливає і тип провідності прошарку кремнію, тобто на пластинах (110)

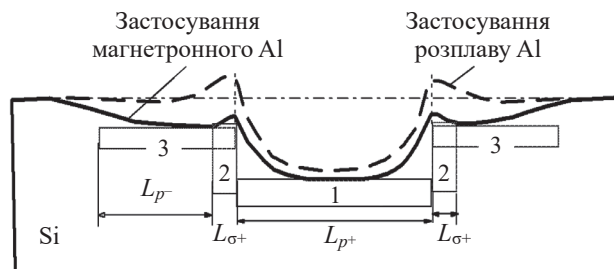


Рис. 2. Порівняння профілів травлення ТМ структур, де зони формувалися з використанням напиленого Al та ВВЗ Al з розплаву

зручно формувати як чипи тиристорної групи, так і діоди прямої полярності.

В ході роботи були отримані фотографії профілів (сколів) та зображень поверхні ямок травлення в області ТМ, де зони формувалися як з використанням напиленого Al, так і ВВЗ Al з розплаву. Особливості профілів ямок травлення ТМ структур за різними технологіями формування зони показано на рис. 2.

Швидкість травлення Si залежить від концентрації легуючої домішки, Al, та наявності й величини механічних напружень [4]. Напруження стиснення, які виникають у межах зони ТМ по периметру, призводять до сповільнення швидкості травлення Si. Легування кремнію алюмінієм спричинює утворення механічних напружень розтягу і збільшення швидкості травлення. Ямки травлення ТМ структур з технологією ВВЗ Al з розплаву мають дві характерні області (рис. 2): область 1 (L_{p+}) з максимальною швидкістю травлення легованого кремнію зони ТМ і область 2 ($L_{\sigma+}$) з мінімальною швидкістю травлення вихідного кремнію з механічним напруженням стиснення на межі зони ТМ. Область 2 відповідає локальному максимуму рівня МПТ, де і спостерігається утворення виступу поверхні кремнію у вигляді горбка. Для ямок травлення ТМ структур за технологією з використанням напиленого Al додається ще одна чітко виражена область 3 (L_{p-}) змінної глибини, що розташовується за межами зони ТМ і характеризується підвищеною, у порівнянні з структурами ВВЗ, швидкістю травлення вихідного кремнію.

Аналіз умов проведення процесу ТМ дозволяє пояснити відмінності профілів травлення структур на рис. 2 таким чином. В процесі ТМ (1240°C) відбувається випаровування Al і його переосадження. Так, легування Si пересадженим Al в області 3 призводить до підвищення швидкості травлення. Аналізуючи наведені профілі травлення структур, можна сказати, що порівняно з напиленим Al у разі ВВЗ кількість пересадженого Al є набагато меншою, що пояснюється набагато меншим тиском пружких парів Al на початку процесу ТМ. Також свою роль відіграє більш швидке занурення зон, сформованих ВВЗ, що зменшує час випаровування алюмінію. В процесі переосадження Al відбувається нерівномірне, із максиму-

мом біля границі легування. Відповідно, й підвищення швидкості травлення є максимальним біля границі. Саме цим і пояснюється утворення заглиблень в області 3 структур з напиленням Al. Заглиблення, подібні областям 3, можуть спостерігатися і в інших випадках, наприклад на фініші процесу ТМ при виході Al на поверхню Si та наступного його випаровування й переосадження. Якщо такі процеси підлегуювання структур є недопустимими, використовують захист їхньої поверхні плівками SiO_2 , а для їх післяопераційного видалення застосовують процеси травлення, описані, наприклад, у [7].

Межа зони ТМ чітко визначається за дислокаційними слідами і проходить вздовж вершини області 2, як це показано на фотографії МПТ на **рис. 3**. Дислокаційні сліди в області ТМ біля межі мають витягнуту трикутну форму, причому кут їхньої спрямованості залежить від кристалографічної орієнтації межі і, відповідно, напрямку направленості механічних напружень. Так, кут між напрямками спрямованості дислокаційних слідів у бокових сторін канавок ТМ областей близький до 60° .

Деякі особливості процесу ТМ можна пояснити утворенням механічних напружень.

Процеси рідинного травлення Si та розчинення Si в розплаві Si+Al мають певну подібність. Можна припустити, що вплив механічних напружень залежно від кристалографічного напрямку їх спрямування також є подібним. У [17] показано, що напрямки [110] і [100] мають екстремальні збільшення та зменшення швидкості травлення, відповідно, для напружень розтягу та стиску. Так само за наявності механічних напружень в цих напрямках можуть спостерігатися відповідні збільшення та зменшення швидкості руху зон розплаву для процесів ТМ. Зменшення швидкості ТМ [110] може викликати ускладнення процесу ТМ. Для [111] залежність від спрямування

механічних напружень не є значною як для травлення, так і для процесів ТМ, тому тут і не виникає критичних ускладнень процесів ТМ через нерівномірне занурення зон на етапі стартового занурення. У випадку ТМ [110] зі застосуванням вакуумного напилення Al наявність структурних включень на поверхні Si може призводити до нерівномірного розчинення кремнію. При нерівномірному стартовому зануренні сусідні локальні фронти, що знаходяться на різних рівнях, можуть утворювати вертикальні напруження стиску, які сповільнюють процес ТМ [110], тобто є бар'єром. Відповідно, локальний фронт зони, який рухається із відставанням, вибирає шлях найменших енергетичних втрат і оминає подібні бар'єри, і тому може відділятися і зміщуватися від фронту, який рухається з випередженням. Разом всі такі локальні відхилення можуть призводити до макропорушень топології і виникнення паралельних зон. Таким чином, нерівномірне утворення зон на старті різко посилює ймовірність фасетування. Через локальність розглянуті вертикальні напруження стискання, які накладаються на макронапруження температурного вигину пластини, можуть мати переважний вплив на локальні ТМ-процеси розчинення кремнію, але завдяки оптимально вибраному способу формування, геометрії лінійних зон і режиму їх занурення вдалося уникнути фасетування на старті й отримати стабільну міграцію ансамблю лінійних зон надалі.

Висновки

Таким чином, показана можливість стабільної міграції довільно орієнтованих лінійних зон на кремнії з орієнтацією (110), причому зроблено це вперше в світовій практиці. Результат був досягнутий на обладнанні зі стаціонарним градієнтним полем при ретельному виконанні наведених у [8] умов.

Це стало можливим, по-перше, завдяки формуванню дискретних зон методом вибіркової примусової високотемпературної взаємодії (змочування) розплаву алюмінію з відкритим немаскованим кремнієм. По-друге, важливим було ретельне виконання температурно-часового регламенту ТМ, особливо на стадії занурення зон. Застосування більш інтенсивного, ніж для кремнію (100) і (111), режиму занурення теж відіграло позитивну роль. І, насамкінець, успішному технологічному розв'язанню задачі сприяло те, що міграція лінійних зон відбувалася єдиною сукупністю усіх складових елементів (ансамблем). Це досягалось як технологічними режимами, так і по можливості однаковими топологічними умовами, в тому числі завдяки створенню допоміжних зон, рівномірному розміщенню зон по площині шару ТМ, з'єднанню зон між собою, завданню необхідної ширини зони.

Порівняно з кремнієм (100), всі ці вимоги й умови мають виконуватися ще більш ретельно. Товщина зон, можливо, має бути дещо більшою, ніж для крем-

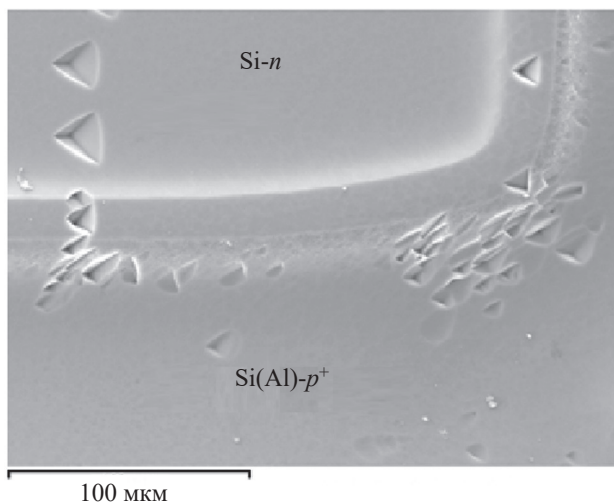


Рис. 3. Фотографія поверхні травлення межі ТМ області Si(Al)- p^+ та Si-n для зразків, сформованих за технологією BB3 Al з розплаву

нію (100). Це може викликати певні перестороги щодо погіршення випрямних властивостей високовольтних $p-n$ -переходів ВО, але збільшення кількості матеріалу зон на старті міграції компенсується випаровуванням «надлишкового» алюмінію за підвищеної температури занурювання. Оптимізація в цьому випадку, вочевидь, є можливою.

Сліди занурення зон і вихід їх без розривів і викривлень, особливо на периферії, дозволяють припустити, що і в цьому випадку периферійні $p-n$ -переходи ВО також не будуть мати погіршення U_r порівняно з центральними, отже це дасть можливість створення чипів з великим периметром ВО.

Отримані результати наводять на думку, що у випадку дотримання зазначених вище обмежень і правил кристаліграфічна орієнтація вихідної пластини кремнію не має критичного значення.

Єдиний чинник, який залишився в дослідженні поза увагою, — розподіл блокуючої властивості по площі пластин (110) — міг би висвітлити перспективу використання пластин такої орієнтації діаметром 100 мм і більше. З огляду на відсутність даних щодо електрофізичних властивостей отриманих вертикальних відокремлювальних p^+ -областей на кремнії з орієнтацією (110), можна зауважити, що всі описані технологічні процеси необхідно в подальшому експериментально випробувати при виготовленні кристалів силових напівпровідникових приладів, як це мало місце з десятками тисяч чипів, успішно виготовлених на кремнії з кристаліграфічною орієнтацією (100) і з довільно орієнтованими лінійними зонами для створення ВО. Так, переваги практичного використання кремнію (100) порівняно з кремнієм (111) підтверджуються результатами виготовлення діодів прямої полярності на струм 10—250 А та напругу до 2,5 кВ. Для Si (110) подібних результатів ще немає, і висновки щодо електрофізичних властивостей $p-n$ -переходів ВО, а також розподілу останніх по пластині робити ще зарано.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Попов В. П. *Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов*. Москва, Металлургия, 1987.
2. Cline H. E., Anthony T. R. Thermomigration of aluminum-rich liquid wires through silicon. *J. Appl. Phys.*, 1975, vol. 47, no 6, pp. 2332–2336.
3. Полухин А. С. Анализ технологических факторов процесса термомиграции. *Силовая электроника*, 2013, № 5, с. 118–120.
4. Кравчина В.В., Полухин О. С. Використання термоміграції в технології силових напівпровідникових приладів. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, 2018, № 3, с. 16–24.
5. Лозовский В. Н., Лунин Л. С., Середин Б. М. Особенности легирования кремния методом термомиграции. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, 2015, т. 18, № 3, с. 179–188.
6. Лозовский В. Н., Ломов А. А., Середин Б. М. и др. Термомиграционные p -каналы: реальная структура и электрические свойства. *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*, 2017, вып. 2 (245), с. 29–38.
7. Lu B., Gautier G., Valente D. и др. Etching optimization of post aluminum-silicon thermomigration process residues. *Microelectronic Engineering*, 2016, vol. 149, p. 97–105. <https://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2015.10.004>
8. Полухин А.С. Термомиграция неориентированных линейных зон в кремниевых пластинах (100) для производства чипов силовых полупроводниковых приборов. *Компоненты и технологии*, 2008, №11, с. 97–100.
9. Chang M., Kennedy R. The application of temperature gradient zone melting to silicon wafer processing. *J. Electrochem. Soc.*, 1981, vol. 128, iss. 10, pp. 2193–2198.
10. Майстренко В. Г. Исследование кристаллизационных процессов при погружении жидких включений в условиях интенсивного испарения. *Межвуз. сб. «Кристаллизация и свойства кристаллов»*, 1985, с. 72–78.
11. Morillon B., Dilhac J.-M, Auriel G. et al. Realization of a SCR on an epitaxial substrate using Al thermomigration. *13th European Solid-State Device Research Conference*, 2002, pp. 327–330. <https://dx.doi.org/10.1109/ESSDERC.2002.194935>
12. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnels. *Rapport LAAS N°02460*, 2002.
13. Chung C. C., Allen M. G. Thermomigration-based junction isolation of bulk silicon MEMS devices. *J. Microelectromechanical Systems*, 2006, vol. 15, no. 5, p.1131–1138.
14. Лозовский В. С. *Моделирование эволюции межфазных границ при термомиграции жидкой зоны в кристалле методом точечных источников*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук, Новочеркасск, 2012.
15. Лунин Л. С., Князев С. Ю., Середин Б. М. и др. Исследование стабильности термомиграции ансамбля линейных зон с помощью трехмерной компьютерной модели, построенной на основе метода точечных источников поля. *Вестник Южного научного центра*, 2015, т. 11, № 4, с. 9–15.
16. Полухин А. С. Исследование технологических факторов процесса термомиграции. *Силовая электроника*, 2009, № 2, с. 90–92.
17. Горбань А. Н., Кравчина В. В. Анизотропия травления монокристаллического кремния n - и p -типа проводимости с направленными упругими напряжениями. *Известия РАН. Серия физическая*, 2002, № 7, т. 66, с. 1036–1041.

Дата надходження рукопису
до редакції 29.09 2021 р.

THERMOMIGRATION OF NON-ORIENTED ALUMINIUM-RICH LIQUID ZONES THROUGH (110) SILICON WAFERS

The paper analyzes the reasons and factors that allow avoiding faceting of non-oriented linear zones. It is shown that in the manufacture of semiconductor chips with a large perimeter and a reverse voltage of 2000 V, the conditions sine qua non to create isolating walls on silicon wafers with an orientation different from (111) are to form an ensemble of linear zones by the method of high-temperature selective forced wetting (HSV) and to fulfill a number of requirements to the “thermomigration” photomask and zones immersion stage during TM at high temperatures. It is shown that these factors provide a stable migration of an ensemble of linear zones through wafers (110) even in a stationary temperature gradient field.

For the first time in the world, the authors practically demonstrate the possibility of stable migration of an ensemble of non-oriented linear zones through silicon (110) in a stationary temperature gradient conditions, outlining the conditions and factors necessary for this process. It is assumed that when the conditions for the formation of linear zones and their immersion are met, the crystallographic orientation of the silicon wafers does not matter at all.

Keywords: temperature gradient, through insulation, liquid linear zones Al + Si, power semiconductor devices, thermomigration.

REFERENCES

1. Lozovsky V. N., Lunin L. S., Popov V. P. *Zonnaya perekristallizatsiya gradiyentom temperatury poluprovodnikovyykh materialov* [Temperature-Gradient Zone Recrystallization of Semiconductor Materials]. Moscow, Metallurgiya, 1987, 232 p. (Rus)
2. Cline H. E., Anthony T. R. Thermomigration of aluminum-rich liquid wires through silicon. *J. Appl. Phys.*, 1975, vol. 47, no 6, pp. 2332-2336.
3. Polukhin A. S. [Analysis of technological factors of the thermomigration process]. *Power Electronics*, 2013, no. 5, pp. 118-120. (Rus)
4. Kravchina V. V. Polukhin O. S. [Thermomigration for technology of powerful semiconductors appliances]. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, no. 3, pp. 16-24. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-3-2> (Ukr)
5. Lozovsky V. N., Lunin L. S., Seredin B. M. [Features of silicon doping by the thermomigration method]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 179-188. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2015-3-179-188> (Rus)
6. Lozovsky V. N., Lomov A. A., Seredin B. M. et al. [Thermomigration p-channels: real structure and electrical properties]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2017, iss. 2 (245), pp. 29-38. (Rus)
7. Lu B., Gautier G., Valente D. et al. Etching optimization of post aluminum-silicon thermomigration process residues. *Microelectronic Engineering*, 2016, vol. 149, pp. 97-105. <https://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2015.10.004>
8. Polukhin A. [Thermomigration of non-oriented linear zones in silicon wafers (100) to manufacture chips of power semiconductor devices]. *Komponenty i Tekhnologii*, 2008, no. 11, pp. 1197-100. (Rus)
9. Chang M., Kennedy R. The application of temperature gradient zone melting to silicon wafer processing. *J. Electrochem. Soc.*, 1981, vol. 128, iss. 10, pp. 2193-2198.
10. Maystrenko V. G. [Study of crystallization processes during immersion of liquid inclusions under conditions of intense evaporation]. *Crystallization and Properties of crystals. Interuniversity Collection of Scientific Works (of the NSTU)*, 1985, pp. 72-78. (Rus)
11. Morillon B., Dilhac J.-M., Auriel G., Ganibal C., Anceau C. Realization of a SCR on an epitaxial substrate using Al thermomigration. *13th European Solid-State Device Research Conference*, 2002, pp. 327-330. <https://dx.doi.org/10.1109/ESSDERC.2002.194935>
12. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnels. *Rapport LAAS N°02460*, 2002.
13. Chung C. C., Allen M. G. Thermomigration-based junction isolation of bulk silicon MEMS devices. *J. Microelectromechanical Systems*, 2006, vol. 15, no. 5, pp. 1131-1138.
14. Lozovskii V. S. [Modeling the evolution of inter phase boundaries during thermomigration of a liquid zone in a crystal by the method of point sources]. PhD (tech. sci.) diss. abstr., Novocheerkassk, 2012. (Rus)
15. Lunin L. S., Knyazev S. Yu., Seredin B. M. et al. [The study of stability of thermomigration of an ensemble of linear zones using a three-dimensional computer model constructed on the basis of the field point sources method]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*, 2015, vol. 11, iss. 4, pp. 9-15. (Rus)
16. Polukhin A. S. [Study of the technological factors of the thermomigration process]. 2009, *Power Electronics*, no. 2, pp. 90-92. (Rus).
17. Gorban O. N., Kravchina V. V. [Anisotropy of etching of monocrystalline silicon of n- and p-type conductivity with directed elastic stresses]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya*, 2002, no. 7, vol. 66, pp. 1036-1041. (Rus)

Опис статті для цитування:

Полухін О. С., Кравчина В. В. Термоміграція довільно орієнтованих рідких лінійних зон Al-Si крізь пластини кремнію (110). Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2021, № 5-6, с. 33-40. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.33>

Cite the article as:

Polukhin O. S., Kravchina V. V. Thermomigration of non-oriented aluminium-rich liquid zones through (110) silicon wafers. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 5-6, pp. 33-40. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.33>

Р. С. МЕЛЬНИК, д. т. н. В. Ю. КРАВЕЦЬ, Л. В. ЛІПНИЦЬКИЙ

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

E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

КРИТИЧНІ ТЕПЛОВІ ПОТОКИ ПРИ КИПІННІ В УМОВАХ КАПІЛЯРНОГО ТРАНСПОРТУ У ДВОФАЗНИХ СИСТЕМАХ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ

Представлено результати експерименту для низки зразків капілярних структур, виготовлених з мідних волокон діаметром від 10 до 50 мкм, зі значенням пористості в межах 65—85% і товщиною 0,3 і 0,5 мм. Було визначено, що зниження тиску насичення з 0,1 до 0,012 МПа призводить до зменшення граничних значень теплових потоків на 15—40% залежно від ефективного діаметра пор. В ході досліджень з'ясувалося, що максимум значень теплових потоків досягається для зразків з ефективним діаметром пор від 60 до 80 мкм. Також було визначено, що для зразків з товщиною 0,5 мм граничні теплові потоки на 5—20% вище, ніж для зразків з товщиною 0,3 мм.

Ключові слова: критичний тепловий потік, тиск насичення, капілярна структура, кипіння, парова камера.

Розширення робочого діапазону двофазних теплопередавальних систем з часом стає все більш актуальним завданням у зв'язку з підвищенням рівня тепловідділення електронних компонентів при одночасному зменшенні їхніх габаритних розмірів [1]. В [2] показано, що використання капілярних структур, отриманих за допомогою фемтосекундної лазерної обробки поверхонь з неіржавіючої сталі, дозволяє збільшити значення критичних теплових потоків до 2,5 раз у порівнянні з гладкою поверхнею. Автори пов'язують такі результати з будовою пористої структури, а саме з тим, що в наведеній конфігурації розділяються потоки рідини та пари, чого не відбувається у звичайних анізотропних пористих середовищах. Автори [3] показали, що поверхневі пористі структури можуть збільшити значення критичних теплових потоків на 15—35%. Пористу структуру вони виготовляли методом лазерної обробки зразків з неіржавіючої сталі, товщина пористого шару складала від 10 до 45 мкм. Наведені дослідження проводились в умовах кипіння у великому об'ємі й атмосферного тиску, тому ці результати досить складно використовувати для проектування двофазних систем теплопередачі, таких як теплові труби та парові камери, де пористі структури насичені теплоносієм. Експериментальне дослідження [4], проведене за максимально наближених до функціонування парових камер умов, показало, що граничні значення теплових потоків в таких випадках визначаються транспортними характеристиками пористих структур. В [5] досліджували вплив стану поверхні на транспортні характеристики та ефективність тепловіддачі пористих структур, в яких переміщення робочої рідини відбувається в умовах атмосферного тиску за допомогою капілярного ефекту. Результати показали, що при збільшенні на 53%

витрати теплоносія, яку може забезпечити пориста структура, значення критичної густини теплового потоку зростає на 35—40%.

Що ж до металоволокнистих пористих структур (МВКС), то результатів аналогічних досліджень в літературних джерелах не зустрічається, хоча цей тип пористої структури має свої переваги перед іншими, наприклад високі значення коефіцієнтів проникності [6, 7], що знаходяться в межах від 10—11 до 10—9 м². У цього типу пористих структур, на відміну від розповсюджених порошкових, відсутні закриті пори. Крім того, металоволокнисті пористі структури є досить пластичними та не руйнуються у разі механічної зміни геометрії двофазного пристрою [8].

Важливо зазначити, що складність та стохастичність процесів пароутворення в анізотропних пористих середовищах не дозволяють використовувати чисельні методи для отримання точних результатів. Більшість використовуваних моделей базуються на емпіричних залежностях та мають вузький діапазон застосування.

Для кращого розуміння впливу умов функціонування двофазних теплопередавальних пристроїв на їхню ефективність необхідно проводити експериментальні дослідження, в яких враховується вплив тиску насичення. Такий підхід дозволить врахувати чинники, які залежать від тиску насичення, наприклад відкритий діаметр парових бульбашок і зміна теплофізичних властивостей рідини. Визначення граничних значень теплових потоків у процесах пароутворення дозволить визначити межі функціонування двофазних теплопередавальних систем, що використовуються в системах термостабілізації потужних електронних компонентів.

Метою дослідження є визначення впливу параметрів пористих металоволокнистих структур та температури насичення на максимальні теплові потоки в процесі кипіння теплоносія в умовах його транспортування до зони нагріву завдяки капілярному ефекту.

Експериментальна установка і методика проведення досліджень

Експериментальна установка (рис. 1) — герметична камера, всередині якої розташовується досліджуваний зразок. Експериментальні зразки являють собою спечені волокнисті структури у вигляді дисків з припеченими мідними підкладками, які монтувались на поверхню нагрівача за допомогою пайки м'яким припоєм Sn60Pb40. Наявність мідної підкладки дозволила запобігти всмоктуванню припою пористою структурою в процесі пайки. Нагрівачем був мідний блок з вмонтованими нагрівальними елементами (сумарна потужність 1200 Вт) та температурними датчиками (термопарами), за допомогою яких визначалась величина відведеного теплового потоку. Розрідження в камері створювалось за допомогою вакуумного насосу.

Для підтримки потрібного тиску під час проведення експериментальних досліджень в корпусі камери передбачено теплообмінник, в якому конденсується пара. Відповідно до підведених теплових потоків в теплообміннику змінювалася витрата та температура охолоджувальної рідини, що дозволяло підтримувати необхідний тиск насичення. Для зменшення втрат тепла корпус експериментальної установки було теплоізолювано.

Експериментальні дослідження проводилися за трьох значень тиску насичення: 0,1, 0,025 і 0,012 МПа з максимальним відхиленням $\pm 5\%$. Ці величини від-

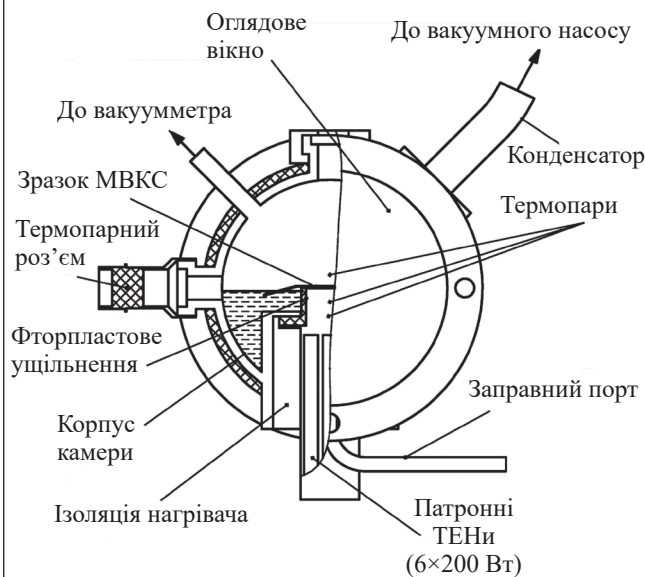


Рис. 1. Схема експериментальної установки для визначення критичних значень теплових потоків

повідують температурам насичення 100, 65 та 50°C, що обиралися з огляду на умови нормального функціонування двофазних систем для охолодження електронного обладнання.

У дослідженнях використовувалися зразки МВКС товщиною 0,3 та 0,5 мм зі значеннями пористості в діапазоні від 65 до 85%, виготовлені з мідних волокон довжиною 3 мм і діаметром d_v від 10 до 50 мкм. Для покращення змочуваності всі зразки проходили термічне окислення. Робоча рідина, у всіх експериментах це була дистильована вода, поступала до робочої області завдяки капілярному ефекту. У загальному випадку умови експерименту були наближені до умов функціонування парових камер.

Результати досліджень та їх обговорення

Після обробки експериментальних даних було отримано графічне представлення залежності коефіцієнту тепловіддачі α від густини теплового потоку. За допомогою цих графіків визначались значення критичних теплових потоків.

Максимальною густиною теплового потоку вважалась та, за якої інтенсивність тепловіддачі була максимальною або близькою до такої. На рис. 2 штриховими лініями вказано області нормального функціонування зразка МВКС для різних значень температури насичення $t_{\text{нас}}$. Область з різким зменшенням ефективності тепловіддачі позначено суцільною лінією.

У процесі узагальнення експериментальних даних було помічено, що гранична густина теплового потоку q_{max} залежить від ефективного діаметра пор зразків $D_{\text{еф}}$. На рис. 3 наведено графіки таких залежностей за температури насичення 100°C для зразків МВКС з волокнами різного діаметра d_v . Як видно, для зразків товщиною $h = 0,3$ мм максимальне значення теплового потоку (120—140 Вт/см²) досягається при значеннях ефективного діаметра пор $D_{\text{еф}} \approx 80$ мкм, після чого починається різкий спад до

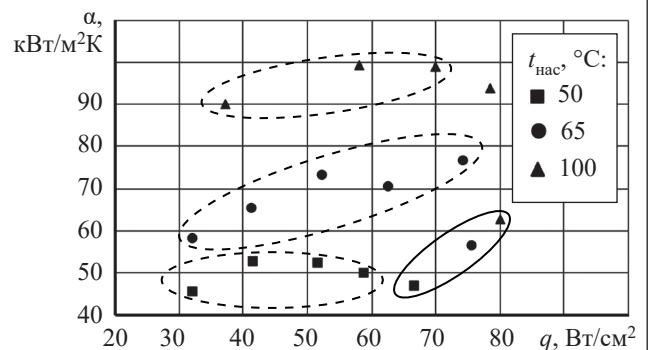


Рис. 2. Типова картина залежності коефіцієнта тепловіддачі від теплового потоку при кипінні в умовах капілярного транспорту за різних значень температури насичення $t_{\text{нас}}$ (суцільною лінією позначено область з різким зменшенням ефективності тепловіддачі)

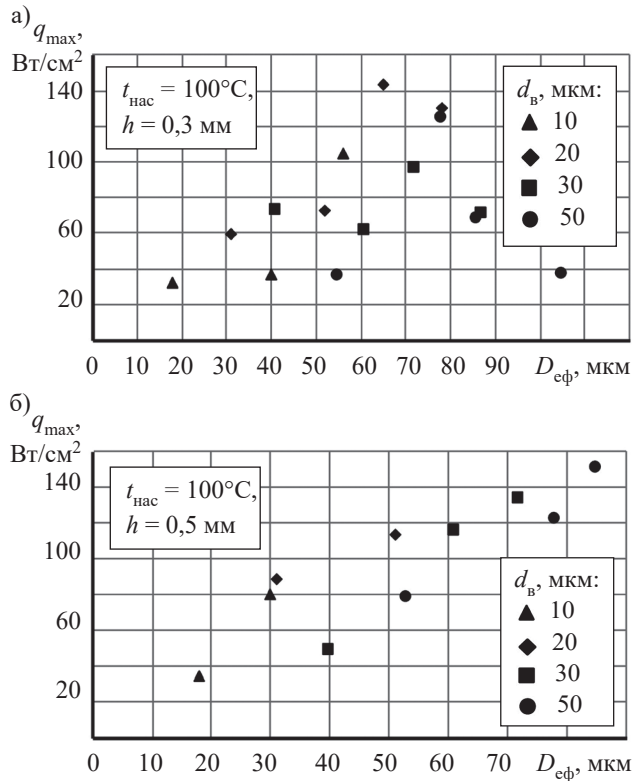


Рис. 3. Залежність максимальних значень густини теплового потоку від ефективного діаметра пор за температури насичення 100°C для зразків МВКС з волокнами різного діаметра товщиною 0,3 мм (а) та 0,5 мм (б)

40 Вт/см² при $D_{\text{eff}} \approx 100$ мкм. У діапазоні D_{eff} від 60 до 80 мкм значення q_{\max} були близькими для зразків товщиною 0,3 та 0,5 мм, проте в діапазоні D_{eff} від 20 до 60 мкм для зразків більшої товщини значення граничної густини теплового потоку було більше на 15—20%.

Аналізуючи рис. 3, можна сказати, що загалом картина для зразків з $h = 0,5$ мм схожа на отриману для зразків з $h = 0,3$ мм. Проте, як вже зазначалося вище, при збільшенні товщини зразка значення максимальних теплових потоків також зростають через збільшену транспортну здатність пористих структур. Тому не можна стверджувати, що пік значень граничних теплових потоків для них буде знаходитися в тому ж діапазоні D_{eff} , оскільки не досліджувалися зразки товщиною 0,5 мм з ефективним діаметром пор більше ніж 80 мкм. З іншого боку, для таких зразків розкид експериментальних точок є меншим, ніж при $h = 0,3$ мм. Це може бути пов'язане з нерівномірністю товщини виготовлених зразків, яка знаходилась в межах 0,01—0,03 мм: чим більше товщина, тим менше такі відхилення впливають на результати експерименту.

Якісно подібні результати отримано за температури насичення 65 та 50°C (рис. 4, 5). Як і в попередньому випадку, для зразків більшої товщини значення граничних теплових потоків були на 10—15% вищі.

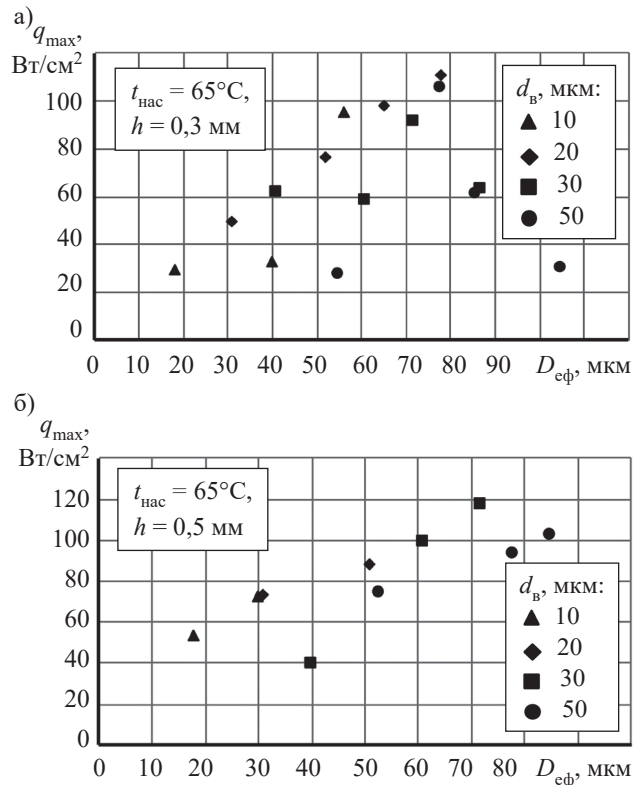


Рис. 4. Залежність максимальних значень густини теплового потоку від ефективного діаметра пор за температури насичення 65°C для зразків МВКС з волокнами різного діаметра товщиною 0,3 мм (а) та 0,5 мм (б)

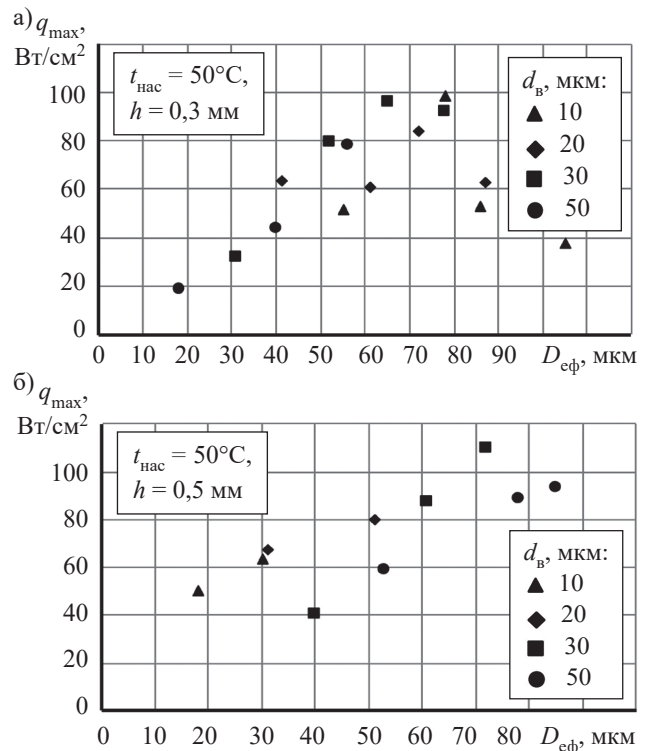


Рис. 5. Залежність максимальних значень густини теплового потоку від ефективного діаметра пор за температури насичення 50°C для зразків МВКС з волокнами різного діаметра товщиною 0,3 мм (а) та 0,5 мм (б)

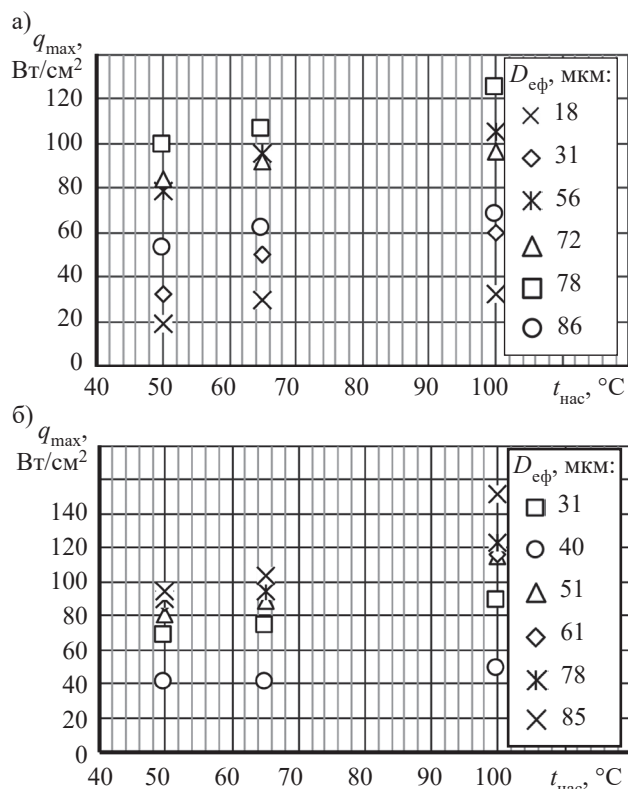


Рис. 6. Залежність максимальних значень густини теплового потоку від температури насичення для зразків МВКС з різним ефективним діаметром пор товщиною 0,3 мм (а) та 0,5 мм (б)

Наявність максимуму величини граничного теплового потоку в діапазоні значень $D_{\text{еф}} = 60\text{—}80$ мкм можна пояснити оптимальним співвідношенням транспортних характеристик пористої структури, до яких відносяться капілярний напір та коефіцієнт проникності, який характеризує здатність пористої структури пропускати рідини або газу. Разом ці два параметри визначають транспортну здатність пористої структури, яка безпосередньо впливає на граничні значення теплового потоку. Було визначено, що величина q_{max} при зниженні температури насичення зі 100 до 50°C теж зменшується на 25—30%. Це, вочевидь, можна пояснити швидшим запарюванням пористої структури через збільшення відривного діаметра парових бульбашок. Крім того, зі зменшенням $t_{\text{нас}}$ зменшується також і значення питомої теплоти пароутворення. Таким чином, за однакових значень теплового потоку за нижчих температур насичення генерується більша кількість парової фази.

На рис. 6 представлено залежність значень максимальної густини теплового потоку від температури насичення для різних $D_{\text{еф}}$. У загальному випадку зменшення $t_{\text{нас}}$ зі 100 до 50°C призводить до зниження q_{max} від 15% (зразок товщиною 0,5 мм з $D_{\text{еф}} = 40$ мкм) до 50% і більше (зразок товщиною 0,3 мм з $D_{\text{еф}} = 31$ мкм). Таким чином вплив температури насичення на граничні значення густини те-

плового потоку є різним за кількісними показниками залежно від ефективного діаметра пор зразка МВКС.

Висновки

Проведене дослідження показало, що зменшення тиску насичення з 0,1 до 0,012 МПа призводить до зменшення критичних теплових потоків при кипінні рідини на 15—50% залежно від параметрів пористої структури. Незалежно від температури насичення оптимальним з погляду максимальних значень теплового потоку діапазоном величини ефективного діаметра пор є 60—80 мкм. Збільшення товщини зразків з 0,3 до 0,5 мм призводить до зростання величини критичного теплового потоку на 10—15%.

Очевидно, що в процесі проектування та створення ефективних систем охолодження на базі теплових труб та парових камер необхідно вибирати капілярну структуру з оптимальними для конкретної задачі параметрами та враховувати фактори, що можуть підвищити теплопередавальні характеристики таких двофазних систем охолодження.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Mori S., Okuyama K. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, vol. 35, no. 10, p. 946–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003>
2. Kruse C.M., Anderson T., Wilson C. et al. Enhanced pool-boiling heat transfer and critical heat flux on femtosecond laser processed stainless steel surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 82, p. 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.023>
3. Hong F. J., Cheng P., Wu H.Y., Sun Z. Evaporation/boiling heat transfer on capillary feed copper particle sintered porous wick at reduced pressure *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 63, p. 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.086>
4. Wen R., Xub Sh., Lee Yu.-Ch., Yangabc R. Capillary-driven liquid film boiling heat transfer on hybrid mesh wicking structures. *Nano Energy*, 2018, vol. 51, p. 373–382. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.06.063>
5. Кравец В. Ю., Мельник Р. С., Червонюк А. А., Шевель С. В. Исследование проницаемости металловолоконистых капиллярных структур тепловых труб для охлаждения электроники. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 3–4, с. 47–52. <https://doi.org/10.15222/teka2020.3-4.47>
6. Косторнов А. Г. *Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов*: В 2 т. Т. 1. Київ, Наукова думка, 2003, т. 2, 548 с.
7. Кравец В. Ю., Кравец Д. В. Механические свойства капиллярных структур применительно к условиям функционирования в тепловых трубах. *Технологический аудит та резерви виробництва*, 2013, т. 1, № 1(9), с. 24–28.
8. Melnyk R. S., Nikolaenko Yu. E., Aleksei Y. S., Kravets V. Yu. Heat transfer limitations of heat pipes for a cooling systems of electronic components. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, 2017, p. 692–695. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100316>

Дата надходження рукопису
до редакції 15.08 2021 р.

CRITICAL HEAT FLUXES DURING BOILING UNDER CAPILLARY TRANSPORT
CONDITIONS IN TWO-PHASE THERMOSTABILIZATION SYSTEMS

The increase in heat generated by electronic components requires a need to expand the range of two-phase heat exchangers for thermal stabilization of the components. The efficiency of the two-phase systems (heat pipes, steam chambers) can be improved by using metal-fiber capillary-porous structures. Experimental studies for the conditions close to the operating conditions of heat pipes and vapor chambers described in known publications are rather incomplete. The aim of this study is to determine the boundary heat fluxes for water boiling on porous structures under capillary soaking, to investigate the influence of saturation pressure and structural parameters on the boundary heat fluxes, and to determine the optimal structural parameters of porous samples, i.e. such parameters that would allow the highest possible values of critical heat fluxes under given conditions.

The authors investigate 0.3 and 0.5 mm thick capillary structure samples made of copper fibers with a diameter of 10 to 50 μm and a porosity range of 65–85%.

The study has found that reducing the saturation pressure from 0.1 to 0.012 MPa leads to a decrease in the boundary heat flux values by 15–40%, depending on the effective pore diameters. The study allowed establishing that the maximum heat flux values are achieved for the samples with an effective pore diameter of 60 to 80 μm . It was also found that for the 0.5 mm thick samples, the boundary heat fluxes are 5–20% higher than for the 0.3 mm thick samples.

The decrease in saturation pressure has been found to lead to a decrease in the range of two-phase heat exchange systems. For a number of samples, the authors have obtained the optimal effective pore diameters ensuring the highest critical heat flux values in the studied range.

Keywords: critical heat flux, saturation pressure, capillary structure, boiling, heat pipe, vapor chamber.

REFERENCES

1. Mori S., Okuyama K. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, vol. 35, no. 10, p. 946–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003>
2. Kruse C.M., Anderson T., Wilson C. et al. Enhanced pool-boiling heat transfer and critical heat flux on femtosecond laser processed stainless steel surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 82, p. 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.023>
3. Hong F. J., Cheng P., Wu H.Y., Sun Z. Evaporation/boiling heat transfer on capillary feed copper particle sintered porous wick at reduced pressure *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 63, p. 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.086>
4. Wen R., Xub Sh., Lee Yu.-Ch., Yangabc R. Capillary-driven liquid film boiling heat transfer on hybrid mesh wicking structures. *Nano Energy*, 2018, vol. 51, p. 373–382. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.06.063>
5. Kravets V. Y., Melnyk R. S., Chervoniuk A. A., Shevel Ye. V. Investigating permeability of metal felt capillary structures of heat pipes for cooling electronics. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 3–4, pp. 47–52. <https://doi.org/10.15222/tkea2020.3-4.47> (Rus)
6. Kostornov A.G. *Materialovedeniye Dispersnykh i Poristyykh Metallov i Splavov* [Materials Science of Dispersed and Porous Metals and Alloys]. Kyiv, Naukova Dumka, 2003, vol. 2, 548 p.
7. Kravets V. Y., Kravets D. V. Capillary structures mechanical properties in respect to functioning conditions in heat pipes. *Technology Audit and Production Reserves*, 2013, vol. 1, no. 1(9), pp. 24–28. (Rus)
8. Melnyk R. S., Nikolaenko Yu. E., Alekseik Ye. S., Kravets V. Yu. Heat transfer limitations of heat pipes for a cooling systems of electronic components. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, 2017, p. 692–695. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100316>

Опис статті для цитування:

Мельник Р. С., Кравець В. Ю., Ліпницький Л. В. Критичні теплові потоки при кипінні в умовах капілярного транспорту у двофазних системах термостабілізації. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 5–6, с. 41–45. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.41>

Cite the article as:

Melnyk R. S., Kravets V. Yu., Lipnitsky L. V. Critical heat fluxes during boiling under capillary transport conditions in two-phase thermostabilization systems. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 41–45. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.41>

Р. С. МЕЛЬНИК, Л. В. ЛІПНИЦЬКИЙ, д. т. н. Ю. Є. НІКОЛАЄНКО,
д. т. н. В. Ю. КРАВЕЦЬ, PhD Д. В. ПЕКУР*

Україна, м Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, *ІФН ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

E-mail: m.roman.kpi@gmail.com, yunikola@ukr.net, demid.pekur@gmail.com

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПАРООУТВОРЕННЯ У ДВОФАЗНОМУ ТЕРМОСИФОНІ ЗА РІЗНОЇ ЙОГО ОРІЄНТАЦІЇ В ПРОСТОРІ

Досліджено вплив орієнтації в просторі двофазного скляного термосифона, заповненого етанолом, на процеси пароутворення за потужності нагрівача 30 Вт за вихідного коефіцієнта заповнення зони випаровування 100%. Проведено відеозйомку процесів пароутворення з частотою 240 кадрів за секунду з наступним розділенням отриманих даних на окремі кадри. Виявлено, що у разі інтенсивного кипіння за кутів нахилу термосифона 5—45° певна частина теплоносія завжди знаходиться поза межами зони нагріву, що зменшує її фактичний коефіцієнт заповнення. Чим менше кут нахилу, тим ця частина більша, а коли він складає 5°, зона нагріву в певні проміжки часу повністю осушується, що може призводити до передчасних кризових явищ.

Ключові слова: термосифон, орієнтація в просторі, візуалізація, генерація пари.

Забезпечення нормальних теплових режимів електронної апаратури є одним з найважливіших завдань при створенні надійних електронних систем. Використання двофазних пристроїв в конструкціях систем охолодження є досить поширеним методом розв'язання проблеми перегріву електронних компонентів [1—3]. Одними з таких теплопередавальних пристроїв є двофазні замкнені термосифони [4, 5], що мають низькі значення теплового опору та є досить простими у виготовленні на відміну від теплових труб [6] чи парових камер [7].

Термосифони використовуються для охолодження, наприклад, підсилювачів потужності радіочастотних систем [8], електронного обладнання дата-центрів [9], світлодіодних джерел світла [10]. Одним з важливих факторів, що впливає на ефективність функціонування таких систем охолодження, є орієнтація термосифонів в просторі. Велика кількість досліджень, наприклад [11—13], присвячена визначенню впливу орієнтації термосифонів на їхні теплопередавальні характеристики. Для кращого розуміння процесів пароутворення та гідродинаміки багато авторів виконували роботи з візуалізації процесів всередині двофазних термосифонів. Автори [14—16] продемонстрували гідродинамічну картину функціонування термосифонів залежно від підведеного теплового потоку, визначили гідродинамічні закономірності та описали етапи кипіння. В цих роботах розглядалися умови з досить протяжними зонами випаровування. Крім того, в більшості подібних

робіт розглянуто режими функціонування переважно при вертикальній орієнтації термосифонів. У [17] наведено гідродинамічну картину за кутів нахилу від 10 до 90°. В нахиленому термосифоні потоки рідини та пари частково розділяються. Рідина повертається до зони випаровування по нижній твірній, в той час як пара рухається вздовж верхньої твірної. Автори [18] описують процес винесення рідини потоком пари до зони конденсації у випадках зростання підведеного теплового потоку за кута нахилу 10° відносно горизонту. В наведених роботах не розглянуто процеси, що виникають у термосифонах з відносно невеликою довжиною зони нагріву, та ефекти, які можуть виникнути у таких випадках.

Метою цієї роботи є експериментальне дослідження з візуалізації процесів пароутворення в термосифоні з короткою зоною випаровування за різних кутів його нахилу до горизонту, які можна було б надалі використовувати для аналізу та пояснення процесів теплообміну в термосифонах.

Експериментальна установка

Для проведення візуалізації процесів, що відбуваються в зоні нагріву у двофазному термосифоні, було виготовлено експериментальну установку (рис. 1). Її робочою ділянкою є прозорий експериментальний зразок скляного термосифона, який закріплювався на лабораторному штативі. Загальна довжина термосифона становила 500 мм, а внутрішній та зовнішній діаметри, відповідно, 9 та 12 мм. Матеріалом корпусу термосифона було обрано кварцове скло C5-1 через його відносно низький коефіцієнт термічного розширення: $(5—6) \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ [19, с. 330], що зменшує ймовірність руйнування термосифона при виникненні кризових явищ.

Автори висловлюють подяку Національному фонду досліджень України за підтримку роботи (проект N 2020.02/0357).

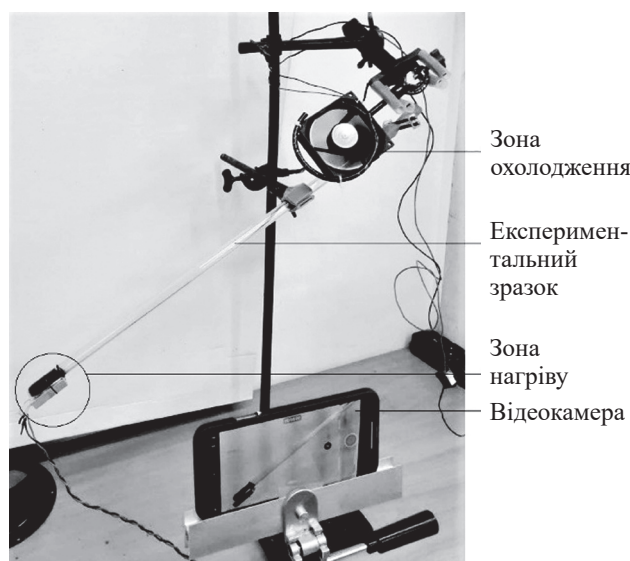


Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки для візуалізації процесів пароутворення в зоні нагріву двофазного термосифона

Експериментальний зразок заповнювали 96%-вим розчином етилового спирту, підфарбованого синім пігментом для збільшення контрастності зображень. Коефіцієнт заповнення, який визначається відношенням об'єму теплоносія до об'єму зони нагріву, становив 100%. Довжина зони нагріву складала 40 мм. Для зручності спостережень на рівні верхньої її межі на термосифон було надіто гумове кільце чорного кольору.

Теплота до зони нагріву підводилася за допомогою електричного нагрівача, закріпленого безпосередньо на експериментальному зразку в області нижньої твірної. Для поліпшення теплового контакту між зразком та нагрівачем використовувалася теплопровідна паста КПТ-8 з коефіцієнтом теплопровідності $0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Охолодження експериментального зразка термосифона відбувалось примусовою конвекцією повітря за допомогою вентилятора з об'ємною витратою повітря $47 \text{ м}^3/\text{год}$, розташованого в зоні охолодження довжиною 60 мм. Температура потоку охолоджувального повітря для всіх досліджень знаходилась в межах $21 \pm 1^\circ\text{C}$.

Методика експерименту

Дослідження проводились для широкого діапазону значень кута нахилу α термосифона — від його вертикального положення ($\alpha = 90^\circ$) до майже горизонтального ($\alpha = 5^\circ$). Тепловий потік, що підводився до зони нагріву, був однаковим і становив 30 Вт.

Перед проведенням експериментальних досліджень було сфотографовано розташування та форму менісків теплоносія всередині термосифона. Після цього термосифон закріплювався на штативі у вертикальному положенні, і до зони нагріву підводив-

ся тепловий потік 30 Вт. Процес пароутворення фіксувався за допомогою відеокамери. З огляду на значну швидкість досліджуваних процесів проводилась швидкісна відеозйомка з частотою 240 кадрів за секунду. Аналогічна фіксація проводилася для всіх інших обраних кутів нахилу (60° , 45° , 30° , 15° , 0°). Для переходу від одного розташування термосифона до іншого нагрівач відключався, і система охолоджувалась до вихідного початкового стану.

Відеофайли оброблялись з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. В результаті було отримано розкадрування процесів пароутворення при різній орієнтації термосифона в просторі.

Результати досліджень

На рис. 2 видно, як впливає орієнтація термосифона в просторі на форму та положення поверхні розділу фаз. Так, для $\alpha = 90^\circ$ — 45° поверхня розділу фаз майже не відхиляється від горизонту та від верхньої межі зони нагріву через дію капілярних сил. Суттєве відхилення спостерігається при $\alpha = 30^\circ$ — 5° , при цьому навіть за малих значень кута нахилу в зоні нагріву знаходиться досить велика кількість теплоносія. Важливо зазначити, що поверхня теплоносія не є горизонтальною та пласкою, як це приймалося при моделюванні процесів теплообміну в нахилених термосифонах у [11]. Вона має певний кут нахилу до горизонту, величина якого залежить від коефіцієнта поверхневого натягу рідини та крайового кута змочування. Сама форма поверхні є наближеною до частково усіченого параболоїда обертання, симетрично-

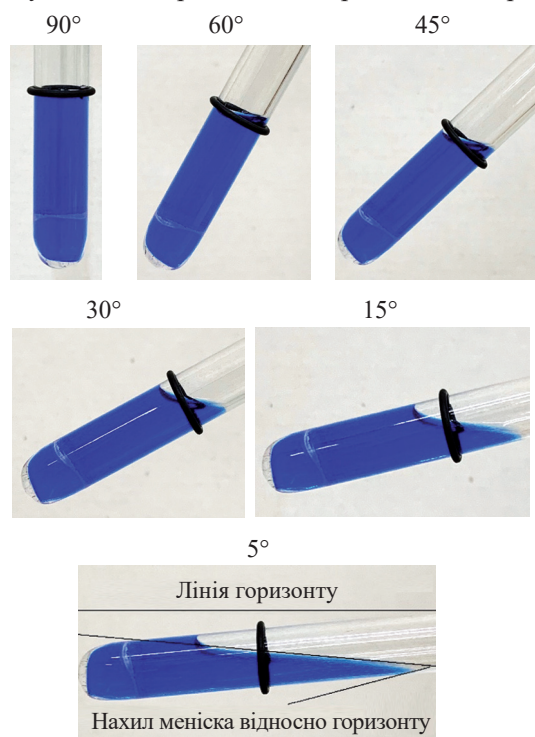


Рис. 2. Вплив орієнтації в просторі двофазного термосифона на форму та положення поверхні розділу фаз

го осі обертання трубки та з вершиною при дні. Все це добре видно на рис. 2 для $\alpha = 5^\circ$.

Проведення досліджень за вертикального розташування термосифона дозволило спостерігати вибухоподібне кипіння перегрітої рідини в зоні нагріву, в результаті чого близько 2/3 теплоносія виносилось із зони випаровування на внутрішню стінку термосифона (кадри 1—3 на рис. 3). Одразу після цього через брак часу на повернення теплоносія із зони транспорту та охолодження процес кипіння проходив в умовах частково заповненої зони нагріву (4—6), а потім майже весь теплоносій повертався до зони випаровування (7—9), і цикл повторювався. Спостереження дозволили зробити висновок, що в умовах вертикальної орієнтації досліджуваного термосифона при активному кипінні зона нагріву більшість часу є заповненою на 30—50%.

Частина теплоносія в паровій фазі бере участь в процесі перенесення теплоти від зони нагріву до зони конденсації. Проте більша частина постійно виноситься із зони нагріву паровими бульбашками та залишається на стінках термосифона. Таким чином в зоні випаровування інтенсивність тепловіддачі зростає завдяки кипінню з тонкої плівки. Дослідження впливу товщини плівки рідини на інтенсивність тепловіддачі проводились в [20], де було доведено, що зі зменшенням товщини шару рідини інтенсивність тепловіддачі збільшується.

Після зменшення кута нахилу від 90° до 60° кількість теплоносія, що виноситься із зони нагріву, майже не змінилась. Парова бульбашка з нижньої твірної піднімається до верхньої та виносить частину

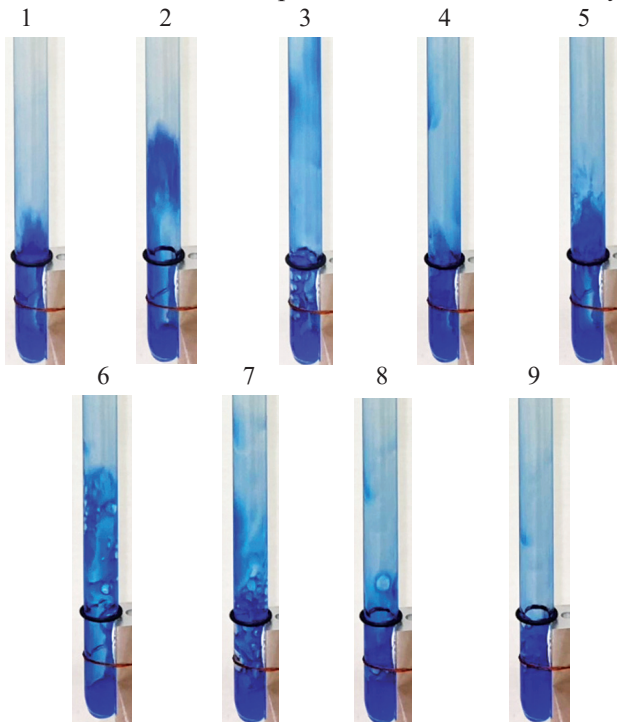


Рис. 3. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: вертикальна орієнтація в просторі

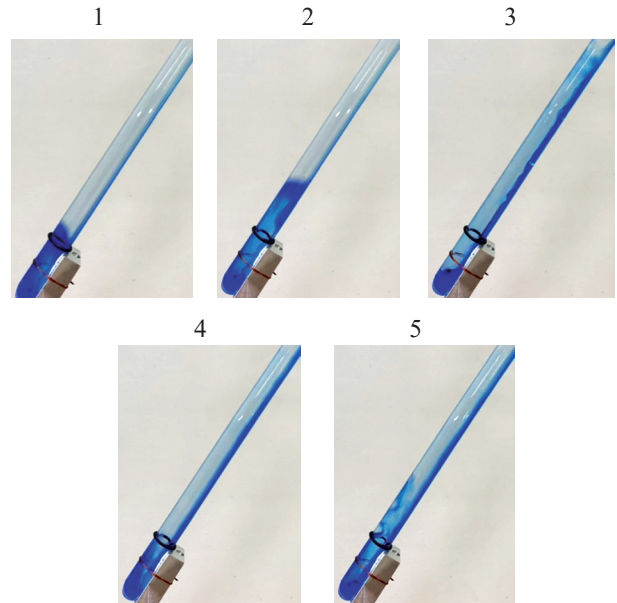


Рис. 4. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: кут нахилу 60°

теплоносія до зони транспорту (кадри 1, 2 на рис. 4). Потім спостерігається розрив тонкої залишкової плівки та вихід парової бульбашки у паровий простір термосифона з частковим винесенням порції теплоносія до зони транспорту (3), після чого теплоносій повертається в зону нагріву під дією гравітаційних сил. Одночасно з цим в зоні нагріву продовжується кипіння в умовах зменшеної кількості теплоносія (4, 5) з винесенням деякої кількості теплоносія до зони транспорту.

При зменшенні кута нахилу до 45° процеси, описані для $\alpha = 60^\circ$, стають більш вираженими (рис. 5). Крім того, проявляються певні особливості — наприклад, утворення вихорів під час виходу парової бульбашки. Після вибухового закипання та виходу парової бульбашки з виносом частини теплоносія (1, 2) за нею слідує наступна бульбашка (3). Винесена частина теплоносія під дією гравітаційних сил повертається до зони нагріву по нижній твірній. В той самий час вздовж верхньої твірної відбувається вихід пари. Завдяки силам тертя пара захоплює верхні шари теплоносія та змінює напрям їхнього руху. За верхніми шарами захоплюються нижні шари, що призводить до утворення вихорів при стіканні теплоносія (4, 5). Такий процес сповільнює повернення теплоносія до зони випаровування. В певний проміжок часу між активаціями центрів пароутворення теплоносій повністю повертається до зони нагріву, а при наступній активації весь описаний процес повторюється.

Аналогічна ситуація спостерігається для кута нахилу 30° (рис. 6). Процеси виносу рідини паровими бульбашками стають більш вираженими, а кількість винесеної рідини стає ще більшею. Також через зменшення кута нахилу зменшується і швидкість по-

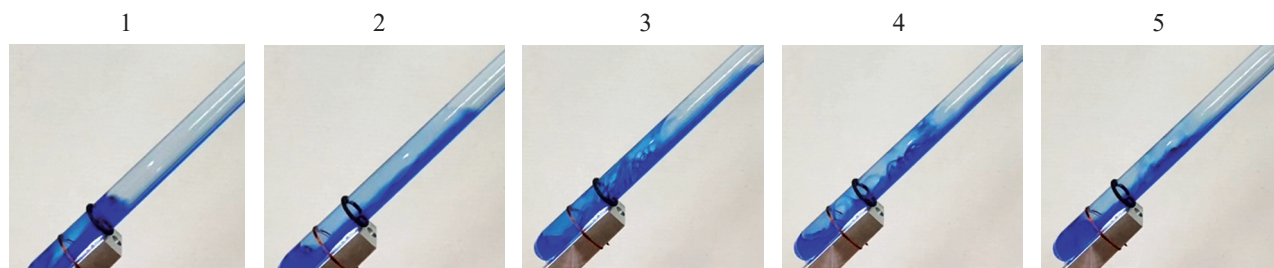


Рис. 5. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: кут нахилу 45°

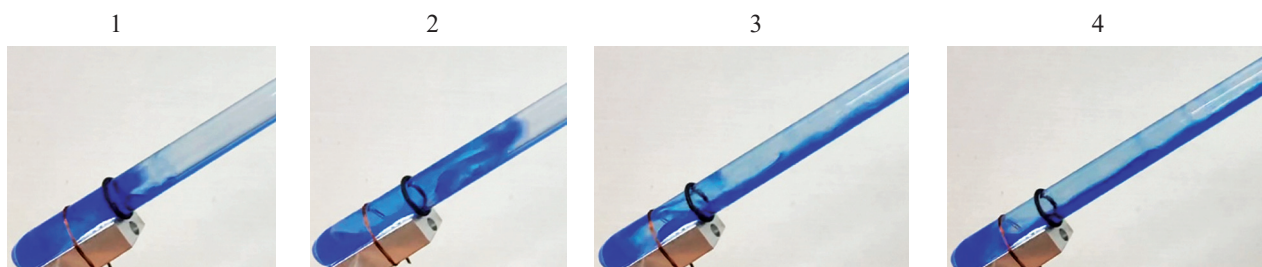


Рис. 6. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: кут нахилу 30°

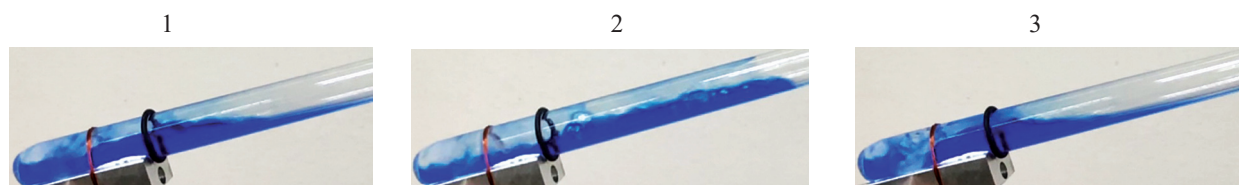


Рис. 7. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: кут нахилу 15°

вернення рідини до зони випаровування. В результаті поруч із зоною випаровування з'являється застійна зона, в якій майже весь час знаходиться частина теплоносія.

За кута нахилу 15° картина процесів пароутворення зберігається (рис. 7), але у порівнянні з $\alpha = 30^\circ$ зростає кількість теплоносія, який знаходиться поза зоною нагріву. Крім того, в певні короткі проміжки часу донець термосифона майже повністю осушується. Очевидно, що в умовах високих значень теплового потоку така ситуація може призвести до виникнення кризових явищ та виходу з ладу системи охолодження. Вихори поза зоною нагріву, спричинені виходом парових бульбашок, стають більш помітними та суттєво уповільнюють процес повернення теплоносія до зони нагріву. З іншого боку, постійне винесення рідини із зони нагріву спричинює утворення тонкої плівки рідини на верхній твірній термосифона, що у свою чергу може призводити до інтенсифікації теплообміну при кипінні.

Зменшення кута нахилу до 5° призводить до того, що в певні проміжки часу зона нагріву майже повністю осушується, і навіть за підведеної потужності 30 Вт залишається лише тонка плівка теплоносія, з якої і відбувається процес кипіння (рис. 8).

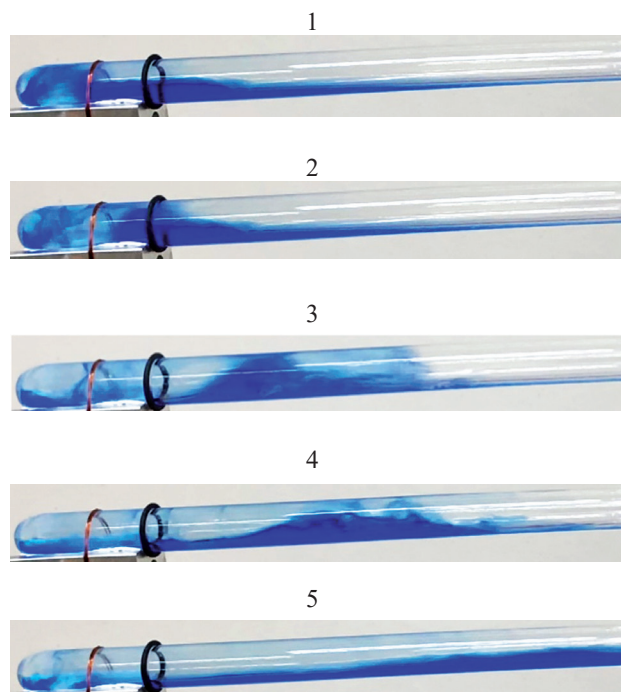


Рис. 8. Процес пароутворення у двофазному термосифоні: кут нахилу 5°

Подібні явища пояснюють, чому саме термосифони та подібні конструкції не використовують для створення систем охолодження при орієнтації в просторі, близькій до горизонту. З іншого боку, в умовах низьких значень теплового потоку подібні конфігурації мають певну перевагу через наявність тонкої плівки рідини майже у всьому перерізі зони випаровування, що призводить до інтенсифікації процесів фазового переходу і, як наслідок, до зменшення термічного опору системи.

Висновки

Дослідження показали, що коефіцієнт заповнення, який визначається відношенням об'єму теплоносія до об'єму зони випаровування, в стані спокою суттєво відрізняється від коефіцієнта заповнення в режимі активного функціонування термосифона з короткою зоною нагріву. Так, за вертикальної орієнтації термосифона з вихідним коефіцієнтом заповнення 100% при активному кипінні теплоносія зона нагріву більшість часу фактично заповнена лише на 30–50%. Достатньо велика частина теплоносія не бере участь у пароутворенні, а просто виноситься паровими бульбашками до транспортної зони, створюючи тим самим додатковий опір. Зі зменшенням кута нахилу зростає частка теплоносія, що знаходиться поза зоною нагріву, і може виникати явище, яке призводить до затримки повернення частини теплоносія через вихід парових бульбашок та утворення вихорів. За кута нахилу 30° поруч із зоною випаровування в зоні транспорту з'являється застійна зона, де майже весь час знаходиться частина теплоносія. Якщо ж кут нахилу дорівнює 5°, у певні проміжки часу зона нагріву практично повністю осушується, що може призводити до передчасних кризових явищ.

Отримані результати можуть бути використані в подальших дослідженнях при аналізі та поясненні особливостей перебігу процесів теплообміну у двофазних термосифонах з короткою зоною випаровування.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Mudawar I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2001, vol. 24, iss. 2, pp. 122–141. <https://doi.org/10.1109/6144.926375>
2. Aranzabal I., Alegria I.M., Delmonte N. et al. Comparison of the heat transfer capabilities of conventional single-phase and two-phase cooling systems for electric vehicle IGBT power module. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, iss. 5, pp. 4185–4194. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2862943>
3. Nikolaenko Y.E., Aleksei E.S., Kozak D.V., Nikolaienko T.Y. Research on two-phase heat removal devices for power electronics. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 8, pp. 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.09.012>
4. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. Киев, Факт, 2005, 704 с.
5. Кравець В.Ю. Теплообмін в мініатюрних випарувально-конденсаційних системах охолодження. Автореф. дис. ...

д.т.н., спец. 05.14.06, Київ, 2016, 41 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/18462>

6. Kravets V., Aleksei Ye., Aleksei O. et al. Heat pipes with variable thermal conductance property developed for space applications. *Joint 18th IHPC and 12th IHPS*, Jeju, Korea, 2016, pp. 103–110. <https://www.researchgate.net/publication/312017754>
7. Xie D., Sun Y., Wang G. et al. Significant factors affecting heat transfer performance of vapor chamber and strategies to promote it: A critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 175, art. no. 121132. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121132>
8. Siedel S., Robinson A.J., Kempers R., Kerslake S. Development of a naturally aspired thermosiphon for power amplifier cooling. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 525, no. 1, art. no. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/525/1/012007>
9. Nadjahi C., Louahlia-Gualous H., Le Masson S. Experimental study and analytical modeling of thermosiphon loop for cooling data center racks. *Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 56, pp. 121–142. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02695-x>
10. Li J., Tian W., Lv, L. A thermosiphon heat pipe cooler for high power LEDs cooling. *Heat Mass Transfer*, 2016, vol. 52, pp. 1541–1548. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1679-z>
11. Wu Y., Zhang Z., Li W., Xu D. Effect of the inclination angle on the steady-state heat transfer performance of a thermosiphon. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, art. no.3324. <https://doi.org/10.3390/app9163324>
12. Alammari A.A., Al-Dadah R.K., Mahmoud S.M. Numerical investigation of effect of fill ratio and inclination angle on a thermosiphon heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 108, pp. 1055–1065. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.163>
13. Payakaruk T., Terdtoon P., Ritthidech S. Correlations to predict heat transfer characteristics of an inclined closed two-phase thermosiphon at normal operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 2000, vol. 20, iss. 9, pp. 781–790. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00047-2)
14. Smith K., Robinson A. J., Kempers R. Confinement and vapour production rate influences in closed two-phase reflux thermosyphons Part B: heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 120, pp.1241–1254. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.046>
15. Smith K., Kempers R., Robinson A.J. Confinement and vapour production rate influences in closed two-phase reflux thermosyphons Part A: flow regimes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 119, pp. 907–921. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.049>
16. Sichamnan S., Chompookham T., Paramethanuwat T. A case study on internal flow patterns of the two-phase closed thermosiphon (TPCT). *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, vol. 18, pp. 100586. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100586>
17. Shirashi M., Terdtoon P., Murakami M. Visual study on flow behavior in an inclined two-phase closed thermosiphon. *Heat Transfer Engineering*, 1995, vol. 16, no. 1, pp. 53–59. URL: <https://doi.org/10.1080/01457639508939845>
18. Kim Y., Shin D.H., Kim J.S. et al. Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosiphon with various filling ratios. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 145, pp. 328–342. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.037>
19. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. Москва, Атомиздат, 1976, 1008 с.
20. Толубинский В.И., Антоненко В.А., Кривешко А.А., Островский Ю.Н. Подавление пузырькового кипения в неподвижной пленке жидкости. *Теплофизика высоких температур*, 1977, т. 15, № 4, с. 822–827.

Дата надходження рукопису
до редакції 21.09 2021 р.

Ukraine, Kyiv, National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»,*V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of UkraineE-mail: m.roman.kpi@gmail.com,
yunikola@ukr.net, demid.pekur@gmail.comVISUALIZATION OF VAPORIZATION EVENTS IN TWO-PHASE THERMOSYPHONS
OPERATING IN DIFFERENT ORIENTATIONS

Currently, thermosyphons are used to cool such devices as power amplifiers of radio frequency systems, data center hardware, LED light sources, etc. One of the important factors affecting the efficiency of such cooling systems is the orientation of the thermosyphons in space.

This paper is dedicated to research and visualization of vaporization events in two-phase thermosyphons, primarily focusing on investigating and visualizing the influence of orientation in space on vaporization. The studies were performed for 100% fill ratio. Vaporization was video recorded at 240 frames per second, whereupon the obtained footage was converted into image sequence. The analysis of the obtained materials has shown that at intensive boiling for tilt angle range of 5–45°, a part of the working fluid is always outside the evaporator. When the angle is decreased, the portion of the working fluid outside the evaporator increases. Moreover, for the 5° tilt angle, the evaporator can be completely drained at certain time intervals. It is proposed that the thermal resistance at low heat flux values for smaller tilt angles can be lower than for vertical orientation because of thin liquid films. Evaporation is more effective in thin liquid films than in large volumes. This prompts the conclusion that smaller angles will allow obtaining lower thermal resistance for the same filling ratio. On the other hand, maximum heat transfer ability decreases dramatically for the angle range of 0–10°.

The obtained results can be used in further studies to analyze and explain the aspects of heat transfer in two-phase thermosyphons with a short evaporator.

Keywords: thermosyphon, orientation in space, visualization, vaporization.

REFERENCES

1. Mudawar I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2001, vol. 24, iss. 2, pp. 122–141. <https://doi.org/10.1109/6144.926375>
2. Aranzabal I., Alegria I.M., Delmonte N. et al. Comparison of the heat transfer capabilities of conventional single-phase and two-phase cooling systems for electric vehicle IGBT power module. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, iss. 5, pp. 4185–4194. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2862943>
3. Nikolaenko Yu. E., Alekseik E.S., Kozak D.V., Nikolaienko T.Yu. Research on two-phase heat removal devices for power electronics. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 8, pp. 418–425, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.09.012>
4. Bezrodnyy M.K., Pioro I.L., Kostyuk T.O. *Protsessy perenosu v dvukhfaznykh termosifonnykh sistemakh. Teoriya i praktika*. [Transfer processes in two-phase thermosiphon systems. Theory and practice]. Kiyev, Fakt, 2005, 704 p. (Rus)
5. Kravets' V. Yu. *Teploobmin v miniaturnykh vyparoval'no-kondensatsiynykh sistemakh okholodzhennya* [Heat transfer in miniature evaporation-condensation cooling systems] Dr. tech. sci. diss. abstr., Kyiv, 2016, 41 p. (Ukr) <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/18462>
6. Kravets V., Alekseik Ye., Alekseik O. et al. Heat pipes with variable thermal conductance property developed for space applications. *Joint 18th IHPC and 12th IHPS*, Jeju, Korea, 2016, pp. 103–110. <https://www.researchgate.net/publication/312017754>
7. Xie D., Sun Y., Wang G. et al. Significant factors affecting heat transfer performance of vapor chamber and strategies to promote it: A critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 175, art. no. 121132. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121132>
8. Siedel S., Robinson A.J., Kempers R., Kerslake S. Development of a naturally aspirated thermosyphon for power amplifier cooling. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 525, no. 1, art. no. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/525/1/012007>
9. Nadjahi C., Louahlia-Gualous H., Le Masson S. Experimental study and analytical modeling of thermosyphon loop for cooling data center racks. *Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 56, pp. 121–142. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02695-x>
10. Li J., Tian W., Lv L. A thermosyphon heat pipe cooler for high power LEDs cooling. *Heat Mass Transfer*, 2016, vol. 52, pp. 1541–1548. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1679-z>
11. Wu Y., Zhang Z., Li W., Xu D. Effect of the inclination angle on the steady-state heat transfer performance of a thermosyphon. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, art. no. 3324. <https://doi.org/10.3390/app9163324>
12. Alammam A.A., Al-Dadah R.K., Mahmoud S.M. Numerical investigation of effect of fill ratio and inclination angle on a thermosiphon heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 108, pp. 1055–1065. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.163>
13. Payakaruk T., Terdtoon P., Ritthidech S. Correlations to predict heat transfer characteristics of an inclined closed two-phase thermosyphon at normal operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 2000, vol. 20, iss. 9, pp. 781–790. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00047-2)
14. Smith K., Robinson A. J., Kempers R. Confinement and vapour production rate influences in closed two-phase reflux thermosyphons

Part B: heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 120, pp.1241–1254. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.046>

15. Smith K., Kempers R., Robinson A.J. Confinement and vapour production rate influences in closed two-phase reflux thermosyphons Part A: flow regimes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 119, pp. 907–921. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.049>

16. Sichamnan S., Chompookham T., Parametthanuwat T. A case study on internal flow patterns of the two-phase closed thermosyphon (TPCT). *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, vol. 18, pp. 100586. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100586>

17. Shiraishi M., Terdtoon P., Murakami M. Visual study on flow behavior in an inclined two-phase closed thermosyphon. *Heat*

Transfer Engineering, 1995, vol. 16, no. 1, pp. 53–59. URL: <https://doi.org/10.1080/01457639508939845>

18. 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>

19. *Tablitsy fizicheskikh velichin: Spravochnik* [Tables of physical quantities: a handbook]. Ed by. I.K. Kikoin. Moscow, Atomizdat, 1976, 1008 p. (Rus)

20. Tolubinskiy V.I., Antonenko V.A., Kriveshko A.A., Ostrovskiy Yu.N. [Suppression of nucleate boiling in a stationary liquid film]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1977, vol. 15, no 4, pp. 822–827. (Rus)

Опис статті для цитування:

Мельник Р. С., Ліпницький Л. В., Ніколаєнко Ю. Є., Кравець В. Ю., Пекур Д. В. Візуалізація процесів пароутворення у двофазному термосифоні за різної його орієнтації в просторі. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 5–6, с. 46–52. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.46>

Cite the article as:

Melnik R. S., Lipnitskiy L. V., Nikolaenko Yu. E., Kravets V. Yu., Pekur D. V. Visualization of vaporization events in two-phase thermosyphons operating in different orientations. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 46–52. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.46>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Добровольський Юрій Георгійович, докт. техн. наук, доцент, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, м. Чернівці

Єфіменко Анатолій Афанасійович, докт. техн. наук, доцент, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

Карушкін Микола Федорович, канд. техн. наук, керівник відділу, НДІ «Оріон», м. Київ

Ковалюк Захар Дмитрович, докт. фіз.-мат. наук, професор, Чернівецьке відділення Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, м. Чернівці

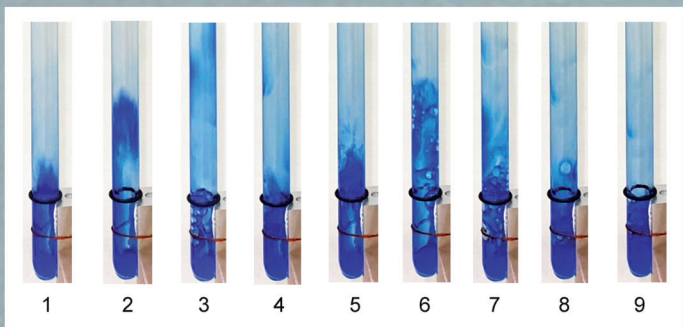
Кукла Олександр Леонідович, докт. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова, м. Київ

Ніколаєнко Юрій Єгорович, докт. техн. наук, провідний науковий співробітник, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

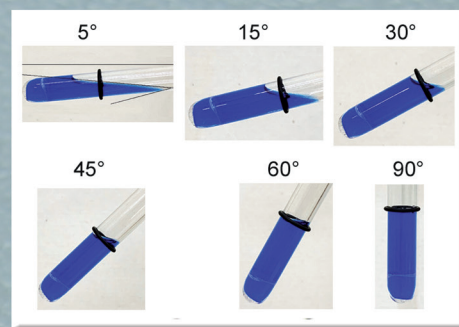
Степенко Сергій Анатолійович, канд. техн. наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів

Трофімов Володимир Євгенович, канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

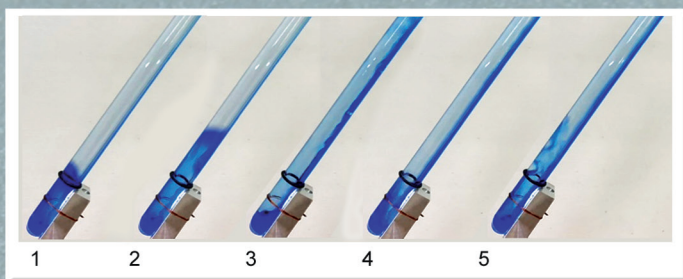
До статті
«Візуалізація процесів пароутворення
у двофазному термосифоні
при різних його орієнтації в просторі»



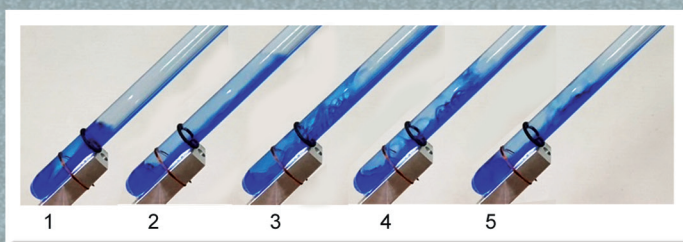
Процес пароутворення у двофазному термосифоні: вертикальна орієнтація в просторі



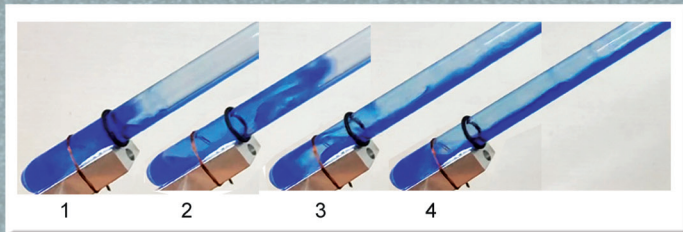
Вплив орієнтації в просторі двофазного термосифона на форму та положення поверхні розділу фаз



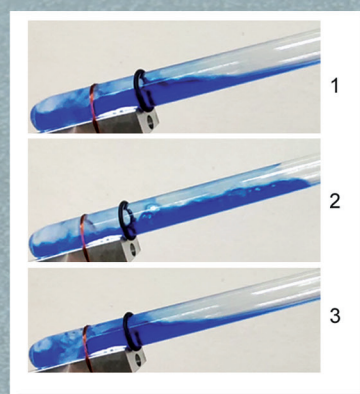
Кут нахилу 60°



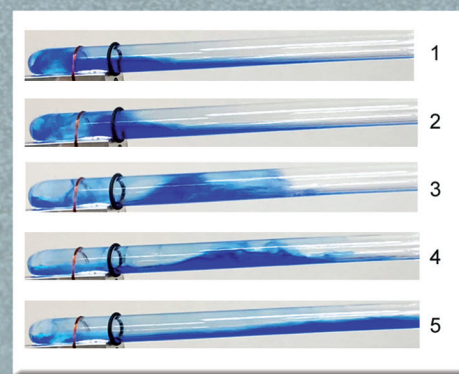
Кут нахилу 45°



Кут нахилу 30°

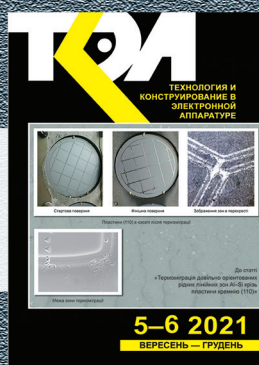


Кут нахилу 15°



Кут нахилу 5°

Номер готували
Запоріжжя, Київ, Миколаїв,
Одеса, Харків, Чернівці, Чернігів.



Пишіть
Передплачуйте
Читайте