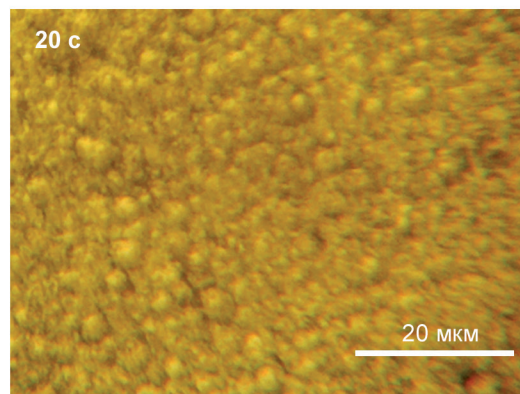
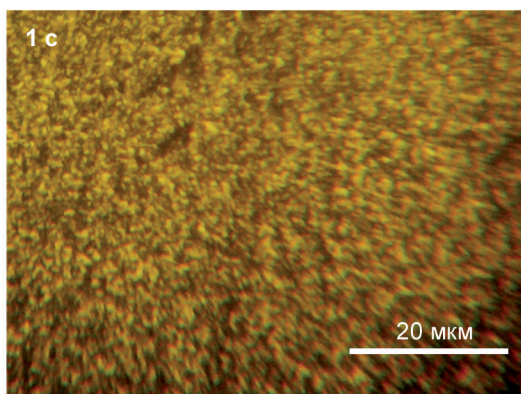
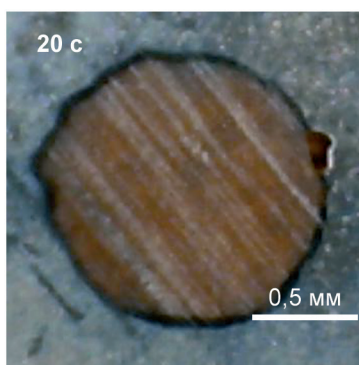
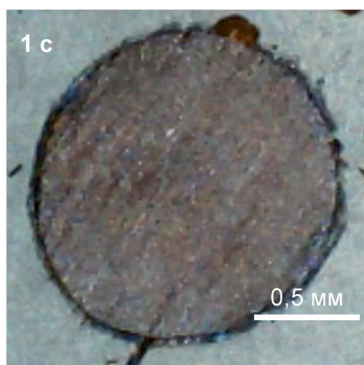


ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ



Зображення поверхні зразків, вирощених за 1 с та за 20 с



Зображення поверхні сферичного шліфа зразків,
вирощених за 1 с та за 20 с

До статті
«Вирощування
гетероепітаксійних шарів
на неізоперіодних підкладках
методом скануючої
рідиннофазової епітаксії»

5—6 2020

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. Бєляєв (м. Київ, Україна)
Д. т. н. М. М. Ваків (м. Львів, Україна)
Д. т. н. Г. О. Оборський (м. Одеса, Україна)
К. т. н. В. М. Чміль (м. Київ, Україна)
О. А. Тихонова (м. Одеса, Україна)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Prof. J. Martins (Caparica, Portugal)
Д. т. н. І. Ш. Неєлюдов (м. Харків, Україна)
Dr. Sc. D. Nika (Chisinau, Moldova)
Д. т. н. Ю. Є. Ніколаєнко (м. Київ, Україна)
Prof. V. Pires (Setúbal, Portugal)
Д. ф.-м. н. С. В. Плаксін (м. Дніпро, Україна)
К. т. н. Прокопець В. М. (м. Київ, Україна)
Prof. E. Romero-Cadaval (Badaajoz, Spain)
К. ф.-м. н. О. В. Рибка (м. Харків, Україна)
К. т. н. П. С. Сафронов (м. Одеса, Україна),
відп. секретар редколегії
Д. т. н. В. С. Ситніков (м. Одеса, Україна)
К. т. н. С. А. Степенко (м. Чернігів, Україна)
Dr. Sc. Z. Stević (Belgrade, Serbia)
Д. х. н. В. М. Томашик (м. Київ, Україна)
К. т. н. В. Є. Трофімов (м. Одеса, Україна)

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

Контактна інформація

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

Редакція

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

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

2020 № 5–6

Рік видання 44-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 випущений за підтримки
ОНПУ (м. Одеса),
НВП «Сатурн» (м. Київ),
НВП «Карат» (м. Львів)

Схвалено до друку
Вченою радою ОНПУ
(Протокол № 4 від 30.11.2020 р.)
Відп. за випуск: О. А. Тихонова

ЗАСНОВНИКИ

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

Одеський національний
політехнічний університет;
Видавництво «Політехперіодика»

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

ЗМІСТ

Технічна політика

Екологічні проблеми освітлення та перспективи застосування енергоощадних світлодіодних освітлювальних систем з комбінованим електроживленням. *Коломзаров Ю. В., Костильов В. П., Сорокін В. М., Ніколаєнко Ю. Є., Пекур І. В., Корнага В. І., Коркішко Р. М.* (українською)..... 3

Нові компоненти для електронної апаратури

Кріогенні термометри опору на основі плівок Ge-InP. *Mimin B. Ф., Холєвчук В. В., Соловйов Є. О., Сіднєв О. Б., Венгер Є. Ф.* (російською) 10

Сучасні електронні технології

p-i-n-фотодіод на основі високоомного кремнію *p*-типу з підвищеною чутливістю на довжині хвилі 1060 нм. *Кукурудзяк М. С., Андрєєва О. П., Ліпка В. М.* (англійською) 16

НВЧ-техніка

Принципи реалізації співвісних НВЧ-з'єднувачів для сучасних радіоелектронних систем. *Глушеченко Е. М.* (російською) 20

Електронні засоби: дослідження, розробки

Трансформація електричного струму анізотропним електропровідним середовищем. *Ащеулов А. А., Дерев'янчук М. Я., Лавренюк Д. А., Романюк І. С.* (російською) 28

Технологічні процеси та обладнання

Вирощування гетероепітаксійних шарів на неізоперіодичних підкладках методом скануючої рідиннофазової епітаксії. *Цибуленко В. В., Шутов С. В.* (українською) 33

Біомедична електроніка

Електронні засоби дослідження механічних властивостей біологічних тканин. *Дубко А. Г., Осінов Р. С., Бондаренко Ю. В., Бондаренко О. Ф.* (українською) 40

Рецензенти номера 47

Інформація для авторів журналу «ТКЕА» 48

Нові книги 27

СОДЕРЖАНИЕ

Техническая политика

Экологические проблемы освещения и перспективы применения энергосберегающих светодиодных осветительных систем с комбинированным электропитанием. *Коломзаров Ю. В., Костильов В. П., Сорокин В. М., Николаенко Ю. Е., Пекур И. В., Корнага В. И., Коркишко Р. М.* (3)

Новые компоненты для электронной аппаратуры

Криогенные термометры сопротивления на основе пленок Ge–InP. *Митин В. Ф., Холевчук В. В., Соловьёв Е. А., Сиднев А. Б., Венгер Е. Ф.* (10)

Современные электронные технологии

p–i–n-фотодиод на основе высокоомного кремния *p*-типа с повышенной чувствительностью на длине волны 1060 нм. *Кукурудзяк Н. С., Андреева О. П., Липка В. Н.* (16)

СВЧ-техника

Принципы реализации соосных СВЧ-соединителей для современных радиоэлектронных систем. *Глушеченко Э. Н.* (20)

Электронные средства: исследования, разработки

Трансформация электрического тока анизотропными электропроводными средами. *Ащеулов А. А., Деревянчук Н. Я., Лаврениук Д. А., Романюк И. С.* (28)

Технологические процессы и оборудование

Выращивание гетероэпитаксиальных слоев на изолирующих подложках методом сканирующей жидкофазной эпитаксии. *Цыбуленко В. В., Шутов С. В.* (34)

Биомедицинская электроника

Электронные средства исследования механических свойств биологических тканей. *Дубко А. Г., Осипов Р. С., Бондаренко Ю. В., Бондаренко А. Ф.* (40)

CONTENTS

Technology policy

Environmental issues of lighting and prospects of energy-saving LED lighting systems with combined power supply. *Kolomzarov Yu. V., Kostilov V. P., Sorokin V. M., Nikolaenko Yu. E., Pekur I. V., Kornaga V. I., Korkishko R. M.* (3)

New components for electronic equipment

Cryogenic resistance thermometers based on Ge–InP films. *Mitin V. F., Kholevchuk V. V., Soloviev E. A., Sidnev A. B., Venger E. F.* (10)

Modern electronic technologies

High-resistivity *p*-type silicon-based *p–i–n* photodiode with high responsivity at the wavelength of 1060 nm. *Kukurudziak M. S., Andreeva O. P., Lipka V. M.* (16)

Microwave engineering

Principles of implementing coaxial microwave connectors for modern radioelectronic systems. *Glushechenko E. N.* (20)

Electronic devices: research, development

Electric current transformation by anisotropic electrically conductive medium. *Ashcheulov A. A., Derevianchuk M. Ya., Lavreniuk D. A., Romaniuk I. S.* (28)

Production technology and equipment

Growing of heteroepitaxial layers on lattice mismatched substrates by the method of scanning liquid phase epitaxy. *Tsybulenko V. V., Shutov S. V.* (34)

Biomedical electronics

Electronic devices for studying mechanical properties of biological tissues. *Dubko A. G., Osipov R. S., Bondarenko Yu. V., Bondarenko O. F.* (40)

К. т. н. Ю. В. КОЛОМЗАРОВ¹, д. ф.-м. н. В. П. КОСТИЛЬОВ¹, д. т. н. В. М. СОРОКІН¹,
д. т. н. Ю. Є. НІКОЛАСНКО², І. В. ПЕКУР¹, к. т. н. В. І. КОРНАГА¹, к. т. н. Р. М. КОРКІШКО¹

Україна, м. Київ, ¹Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, ²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: kolomzarov@yahoo.com, vsorokin@isp.kiev.ua, yunikola@ukr.net

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ОСВІТЛЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГООЩАДНИХ СВІТЛОДІОДНИХ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ З КОМБІНОВАНИМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯМ

Запропоновано концепцію комбінованого електроживлення освітлювальної системи, яка дозволяє зменшити енергоспоживання від централізованої електромережі завдяки використанню фотоперетворювачів сонячної енергії, що підвищує світлову ефективність приладу принаймні на 20% при застосуванні лише промислово впроваджені елементної бази. Конструкція передбачає також відмову від акумуляторів, що значно збільшує термін її експлуатації, надійність та екологічну безпечність, а можливість розміщення фотоелектричних перетворювачів у безпосередній близькості від споживачів дозволяє зменшити омичні втрати й значно підвищити економічну та енергетичну ефективність таких систем.

Ключові слова: система освітлення, сонячна енергетика, світлова ефективність, фотоперетворювачі сонячної енергії.

Світло є невіддільним елементом оточення людини при будь-яких видах і умовах праці та відпочинку. Сучасні освітлювальні прилади зазвичай базуються на використанні світлодіодних технологій, які дозволяють створювати найбільш енергоефективні та екологічно чисті освітлювальні системи.

Швидкі темпи розвитку світлодіодних технологій, а також значне підвищення потужностей окремих світловипромінюючих пристроїв в останні роки значно розширили сфери їхнього застосування, однак більшість таких приладів не може надійно функціонувати без забезпечення робочих теплових режимів використаних в них напівпровідникових структур [1]. Забезпечення оптимальних теплових режимів роботи світлодіодів дозволяє реалізувати високі терміни їхньої служби, а також забезпечити стабільні світлові та спектральні параметри.

Через високі потужності сучасних світлодіодів та світлодіодних матриць (наприклад, світлодіодна матриця типу CLU04J-1818C9 з розмірами 28×28×1,4 мм японської компанії Citizen Electronics Co., Ltd має потужність 191,2 Вт [2]) розробка конструкцій систем охолодження для них являє собою не стільки технічну, скільки наукову задачу, вимагає використання сучасного аналітичного апарату, складного програмного забезпечення та знань в галузі матеріалознавства. Застосування таких підходів при розробці систем охолодження потужних структур, що випромі-

нюють світло, дозволяє оптимізувати їхню конструкцію і забезпечити максимально можливу енергетичну ефективність освітлювального приладу, а також дає можливість створювати конкурентоспроможні світлотехнічні вироби. В останні роки для забезпечення охолодження світлодіодів та світлодіодних матриць високої потужності використовуються енергоефективні двофазні теплопередавальні пристрої — теплові труби [3].

Що стосується живлення світлодіодних систем освітлення житлових та промислових будівель, то воно зазвичай здійснюється при використанні електроенергії, генерованої переважно тепловими електростанціями. За даними, наведеними на сайті Міжнародної енергетичної асоціації [4], на будівлі та будівельні сектори припадає понад третини глобального кінцевого споживання енергії та майже 40% загальних прямих та непрямих викидів CO₂. Попит на енергію в будівлях та під час будівництва будинків продовжує зростати, що зумовлено покращенням доступом до енергії в країнах, що розвиваються, зростанням кількості енергомісних пристроїв та швидким зростанням загальної площі будівель. Викиди CO₂ внаслідок генерації енергії, що споживають житлові та офісні будівлі, зросли за останні роки після стабілізації, яка спостерігалася у 2013 — 2016 рр. При цьому прямі та непрямі викиди CO₂ зросли до 10 Гт у 2019 році, що є найвищим зафіксованим рівнем. Цьому зростанню сприяло декілька факторів, серед яких і наростаючий попит на енергію для опалення та охолодження за допомогою кондиціонерів при екстремальних погодних явищах, для освітлення та побутової техніки. Величезний потенці-

Автори висловлюють подяку Національному фонду досліджень України за підтримку роботи (проект № 2020.01/0216)

ал зменшення викидів CO₂ залишається невикористаним через подальше застосування викопного палива, відсутність ефективної політики енергоефективності та недостатні інвестиції в енергоефективні будівлі.

За сучасними оцінками, понад 35% всієї енергії, яка споживається в будівлях, витрачається на освітлення, при цьому вона залежить від типу будівлі та галузі, і значна її частина — промислові споживачі, що потребують потужного освітлення, в тому числі у денний час [5]. За прогнозом [6], енергетичні потреби людства до середини XXI ст. більш ніж подвоються, а до кінця XXI ст. — більш ніж потрояться, що пов'язано зі зростанням світової економіки в цілому (до 4 разів до 2050 р.), насамперед різким економічним зростанням Китаю та Індії, населення яких становить 2/3 від чисельності населення Землі, а також з помітним зростанням населення Землі — до 2050 року воно досягне 10—11 млрд людей. Інтенсивне зростання рівня світового споживання енергії, одержання якої головним чином базується на спалюванні викопних, не відтворюваних ресурсів та на атомній енергетиці, створило цілу низку складних екологічних, технічних, соціальних, а останнім часом і економічних проблем, які вимагають невідкладного вирішення вже зараз [6—10].

Отже, на початку XXI ст. перед світовою енергетикою постає проблема різкої зміни структури сукупності джерел енергії. Тому останнім часом спостерігається значне посилення інтересу до використання електроенергії, отриманої прямим перетворенням енергії Сонця в електричну за допомогою, зокрема, напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів енергії.

У цій роботі проведено аналіз можливостей побудови потужних енергоощадних світлодіодних освітлювальних систем з комбінованим електроживленням та пошук найбільш ефективних методів для їхньої реалізації.

Енергетичний потенціал генерації електроенергії відновлюваними джерелами на території України

Покращити екологічний стан навколишнього середовища можна кількома шляхами, серед яких зменшення енергоспоживання, зниження використання органічних видів палива при розширенні застосування відновлюваних джерел енергії. Попри те, що людство протягом тисяч років знає, як отримувати енергію з таких екологічно чистих джерел, як вода, вітер та Сонце, широке розповсюдження використання такої енергії обмежено низкою факторів. Розглянемо їх більш детально.

Сьогодні найбільшу потужність вироблення електроенергії з енергії води мають великі гідроелектростанції. Такі електростанції займають земельні ділянки великої площі та мають велику вартість, а крім того — їхнє розміщення жорстко прив'язане до русел повноводних річок, тому більшість придатних для

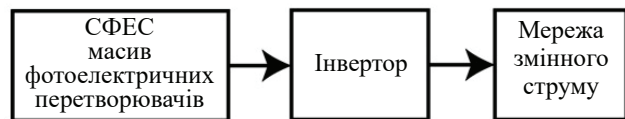
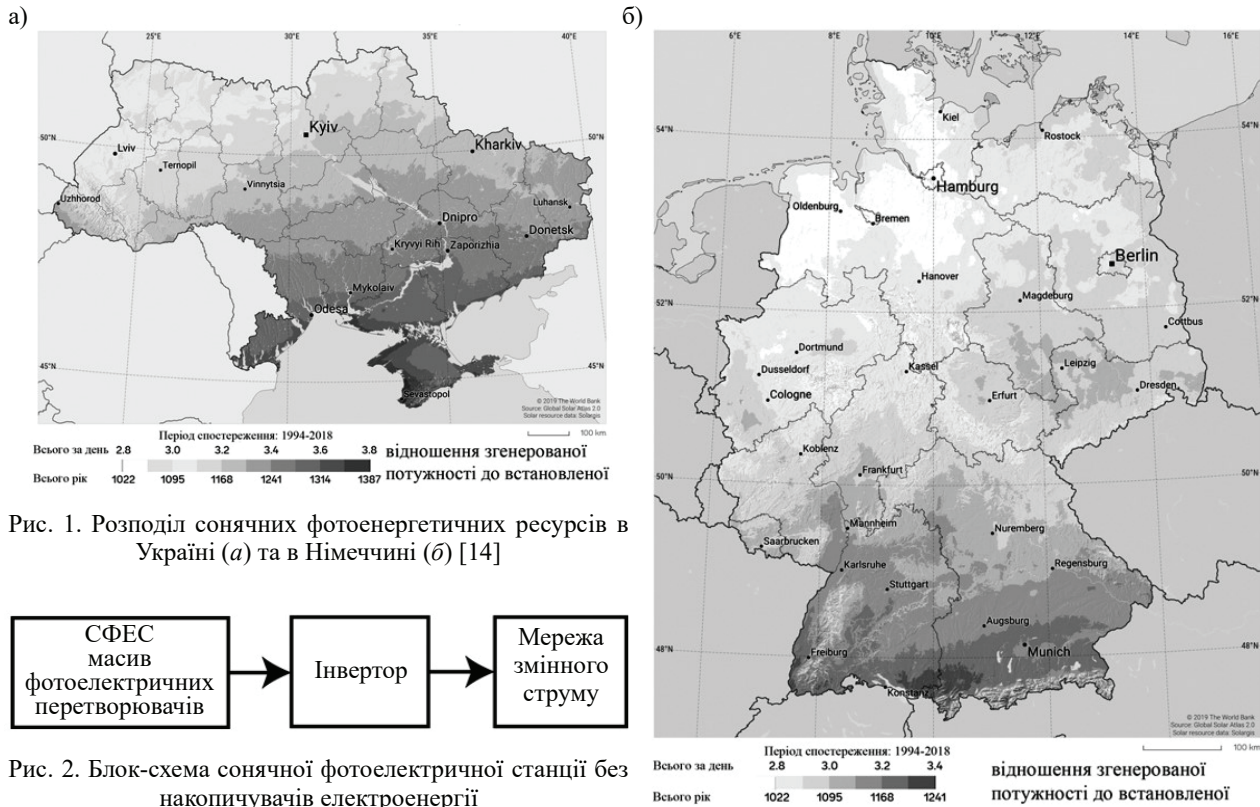
їхньої побудови місць в Україні вже зайнято. Крім того, будівництво гідроелектростанцій супроводжується значними негативними впливами на природне середовище. Це, наприклад, затоплення великих територій для утворення великих запасів води, необхідних для стабільної роботи електростанцій при сезонній зміні рівня води, неможливість проходження риби своїми природними шляхами у весняний період тощо. Гідроелектростанції, які можуть бути побудовані на малих річках України з енергетичним потенціалом приблизно 3750 Мвт [11], потребують значних початкових матеріальних витрат та мають великі терміни окупності.

Вітрова енергетика, що також стрімко розвивається в останні роки, особливо на території Європейських держав, також має свої мінуси, що ускладнюють її широке використання [12]. До таких недоліків можна віднести значні терміни окупності вітрогенераторів через їхню високу вартість, суттєве звукове забруднення середовища, що ускладнює експлуатацію поряд з місцями життя й роботи людей, та необхідність постійного технічного догляду за ними. Сукупний вітроенергетичний потенціал території України складає до 5000 МВт, але для більшої частини території нашої країни він є низьким.

Для систем освітлення більш доступним та перспективним, на наш погляд, є використання сонячної енергії, яку можна отримувати, зокрема, за допомогою напівпровідникових фотоелектричних перетворювачів. Напівпровідникова фотоенергетика останнім часом набула широкого застосування, причому темпи її зростання збільшуються. Зростання світового ринку сонячної фотоенергетики у 2017 р. до майже 100 ГВт у порівнянні з 77 ГВт роком раніше (тобто на 30%) вражає навіть експертів у цій галузі. Загальна потужність встановлених у світі фотоенергетичних електростанцій на кінець 2019 р. складала 635 ГВт, з них 132 ГВт — у Європі [13]. В середньому частка фотоелектричної генерації у світі складає 2,2% від споживаної електроенергії, в Європі — 3,9%, в Німеччині — 8,7%, а в Італії та Греції перевищує 7%.

В Україні сонячні фотоелектростанції також широко використовуються для отримання електричної енергії в промислових цілях, оскільки фотоенергетичний потенціал України достатньо високий і перевищує потенціал європейського лідера в галузі фотоенергетики — Німеччини (рис. 1). Проте не завжди таке використання є вигідним для держави з економічної точки зору. В Україні «зелений тариф», на відміну від Європи (де він взагалі відсутній або малий), є великим і лягає важким тягарем на споживачів і часто викликає негативну реакцію у суспільстві.

До складу значної кількості сонячних електростанцій входять такі накопичувачі електричної енергії, як акумуляторні батареї [15]. Строк їхньої служби досить обмежений, а виробництво та утилізація є



шкідливими з погляду екології процесами. Існують сонячні фотоелектричні станції (СФЕС) без накопичувачів електроенергії (grid-connected) — вони всю надлишкову електроенергію віддають до мережі (рис. 2). Суттєвим недоліком при цьому є жорсткіші вимоги до інвертора такої системи: його вихідна напруга має бути синусоїдальною з малим рівнем гармонік. Крім того, при зменшенні вихідної напруги СФЕС нижче певного рівня інвертор має відключати СФЕС від мережі. Все це значно підвищує вартість такої системи та збільшує термін її окупності.

Водночас у сучасних містах існує значна кількість об'єктів, придатних до розміщення сонячних панелей. Наприклад, значним потенціалом для розміщення сонячних батарей є дахи та фасади будівель, що наближає їх до споживачів виробленої електричної енергії, розташованих в цих будівлях, і при цьому існують рішення, що не впливають на загальний дизайн будівель, а іноді й можуть навіть зробити їх більш сучасними. Слід зазначити, що технічно допустимий потенціал середньорічного виробництва сонячної енергії лише з дахів житлового фонду України сьогодні становить до 4200 МВт [16].

Важливим фактором є те, що у містах зосереджено найбільші площі приміщень, що потребують безперервного штучного освітлення (в денний час включно), наприклад промислові виробничі цехи, торговельні зали, офісні, навчальні та інші приміщення, що постійно потребують якісного освітлення. Використання для цього можливостей екологіч-

но чистої сонячної енергетики є значним, практично невикористаним до теперішнього часу потенційним резервом економії електроенергії та покращення екологічної ситуації у містах.

За необхідності в освітленні у денний час можна побудувати системи з комбінованим живленням від електричної мережі та від фотоелектричних перетворювачів. Використання у системах освітлення світлодіодних технологій дозволяє відмовитися від екологічно небезпечних речовин, на відміну від тих, що побудовані на основі люмінесцентних ламп денного світла, в яких застосовується ртуть. Сучасні накопичувачі електроенергії сконструйовано зазвичай на основі свинцево-кислотних або літєвих акумуляторів, тобто — перші містять канцерогенний свинець, а виробництво других потребує отримання значної кількості літію, що пов'язано з суттєвими енерговитратами та забрудненням довкілля. Відмова від акумуляторів та безпосереднє використання виробленої сонячними панелями електроенергії зменшує навантаження на електричні мережі як промислових підприємств, так і загальних електромереж, спрощує конструкцію таких систем, зменшує їхню вартість та суттєво підвищує надійність. Останнє особливо важливо, враховуючи значні терміни служби сучасних світлодіодів та фотоелектричних перетворювачів, які дозволяють створювати освітлювальні системи з терміном служби до сотні тисяч годин (понад 10 років при неперервному використанні), що додатково знижує потребу у виробництві таких приладів, а

отже, знижує негативний вплив на стан навколишнього середовища.

Для оцінки енергетичного потенціалу таких систем, розміщених, наприклад, у Києві, можна скористатися чисельними інтернет-ресурсами, які дозволяють розрахувати кількість сонячної енергії протягом року. За даними ресурсу [17], величина генерації електроенергії фотоперетворювачем суттєво змінюється протягом року, і через це необхідні не тільки надмірні генеруючі потужності (фотоелектричні перетворювачі), а й накопичувальні пристрої (акумулятори), що значно підвищує вартість таких систем. В той самий час, світлодіодні освітлювальні прилади з комбінованим живленням — і від фотоелектричних перетворювачів, в яких не передбачено використання акумуляторів, і від загальної електромережі в умовах відсутності фотогенерації — можуть бути найефективнішими у використанні фотогенеруючих потужностей.

Для ефективного використання генерованої енергії доцільним є використання освітлювальних систем з найбільш можливою світловою ефективністю. При цьому найбільш відчутний економічний та екологічний ефект досягається у випадку застосування окремих освітлювальних систем з комбінованим живленням, реалізованим за схемою «освітлювальний прилад — система генерації», потужністю 200—500 Вт. Для світлодіодних освітлювальних приладів такий рівень потужності відповідає значенням світлових потоків 20—50 тис. лм, що добре корелює з потребами промислових споживачів освітлення.

При побудові світлодіодних систем освітлення, особливо для промислового використання, переваги надаються пасивним системам охолодження, при цьому використання двофазних пристроїв тепловідведення для потужних джерел світла дозволяє зменшити масо-габаритні розміри їхньої системи охолодження [18—20] та забезпечити потрібні теплові режими роботи напівпровідникових кристалів, що значно збільшує терміни служби.

Для оцінки економічного ефекту від використання подібної системи можна розглянути світлодіодне джерело світла потужністю 250 Вт, яке дозволяє замінити люмінесцентну лампу потужністю 500 Вт. При його експлуатації протягом 12 годин щоденно економія електроенергії за рік складатиме $250 \times 12 \times 365 = 1,1$ МВт·год. Крім того, при використанні додатково трьох сонячних панелей потужністю 100 Вт кожна з загальною площею $2,1 \text{ м}^2$ у стандартному виконанні (без механічних систем слідування за Сонцем та концентраторів сонячного світла) за рік можна додатково отримати 360 кВт·год електроенергії. При цьому буде спостерігатися синергетичний ефект завдяки використанню енергоефективних світлодіодних освітлювальних приладів та додаткової генерації енергії.

Таким чином, загальна економія електроенергії завдяки використанню світлодіодного світиль-

ника та трьох сонячних панелей може складати 1,46 МВт·год. Загальна економія витрат на електроенергію для освітлення за ціни 2,13 грн за 1 кВт·год [21] складає 3100 грн за рік при використанні лише однієї подібної світлодіодної освітлювальної системи з комбінованим електроживленням.

Крім іншого, беззаперечною перевагою використання світлодіодних джерел світла в таких освітлювальних системах є можливість швидко змінювати джерело живлення при збереженні сталого світлового потоку та без значних змін у режимах роботи, проте ефективна реалізація таких процесів потребує створення нових типів систем освітлення та їхнього електроживлення.

Підхід до розроблення систем освітлення з комбінованим електроживленням

При створенні світлодіодних систем освітлення з комбінованим електроживленням необхідно вирішити низку важливих науково-технічних задач щодо розроблення загальної концепції та основних складових частин такої системи.

До складу освітлювальної системи з зазначеним функціоналом мають входити принаймні такі модулі: світлодіодний освітлювальний прилад з світлодіодним модулем (СДМ), фотоелектричний перетворювач (ФЕП), електронні схеми керування світлодіодами з живленням від загальної мережі та від фотоелектрич-

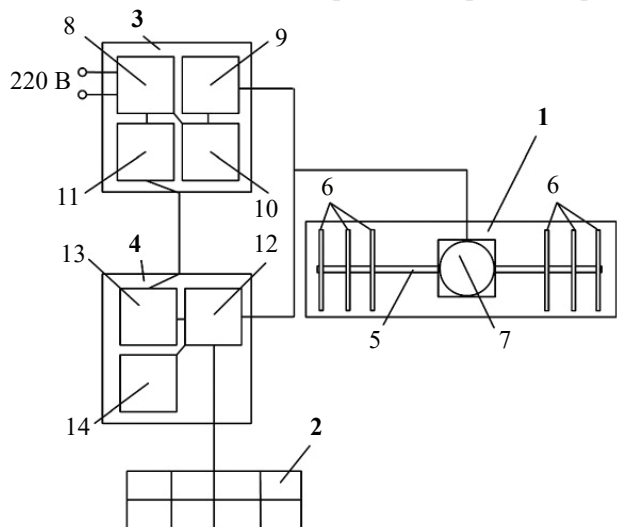


Рис. 3. Структурна схема освітлювальної системи з СДМ та комбінованим електроживленням:

1 — система охолодження СДМ; 2 — сонячна батарея з ФЕП; 3, 4 — електронні схеми керування СДМ з живленням від побутової електричної мережі та від сонячної батареї з ФЕП відповідно; 5 — теплова труба; 6 — ребра охолодження; 7 — СДМ високої потужності; 8, 9 — відповідно вхідний та вихідний каскади електронної схеми керування 3, що живиться від побутової електричної мережі; 10 — каскад контролю струму та напруги; 11 — каскад узгодження потужностей електронних схем керування 3 та 4; 12 — вихідний каскад електронної схеми керування 4, що живиться від сонячної батареї; 13 — вимірювач миттєвої потужності сонячної батареї; 14 — іоністорний накопичувач генерованої енергії

них перетворювачів. Більш детально структура такої системи показана на **рис. 3**.

Особливості роботи такої комбінованої системи освітлення полягають у наступному. За відсутності достатньої генерації електроенергії від відновлюваних джерел, наприклад при роботі системи в нічний час, живлення світлодіодів забезпечується від загальної електричної мережі, а при достатньому рівні генерації система повністю переходить на живлення від відновлюваних джерел. При генеруванні енергії сонячною батареєю на рівні, вищому за потрібний для освітлювальної системи, надлишкова енергія зберігається для подальшого використання у накопичувачі невеликої ємності, побудованому на іоністорних елементах, з високим терміном експлуатації. В процесі роботи системи електронні схеми керування обирають за визначеним алгоритмом найбільш енергоефективний тип живлення — електромережа, сонячні елементи чи накопичена енергія. Перемикання джерел живлення відбувається настільки швидко, що цей момент не можна визначити візуально. Очевидно, що впровадження таких освітлювальних систем потребує розроблення та створення спеціалізованих електронних схем керування, які узгоджують всю роботу та збалансовують потужності.

Передбачається, що фотоелектричний перетворювач не містить у своїй конструкції механічних систем слідування за Сонцем, а закріплюється в оптимальному положенні. І хоча це забезпечує функціонування системи на рівні приблизно 80% від максимально можливої генерованої протягом року потужності, проте виключає необхідність її обслуговування. Крім цього слід зазначити, що для збереження потрібного рівня генерації впродовж принаймні 10 років необхідно застосувати фотоелектричний перетворювач сонячної батареї, номінальна потужність якого на 20% вища за номінальну потужність використаних світлодіодних джерел світла.

Використання в системі охолодження двофазних пристроїв тепловідведення (теплових труб) наразі вважається оптимальним способом забезпечення необхідного теплового режиму потужних світлодіодних джерел світла, що підвищує ефективність перетворення електричної енергії у світлову та надійність роботи освітлювальної системи.

Висновки

Проведений аналіз свідчить про перспективність використання комбінованого живлення від фотоелектричних перетворювачів та від загальної мережі для побудови енергоефективних світлодіодних систем освітлення. Запропонований алгоритм роботи систем керування живленням, за яким у режимі реального часу здійснюється вибір найбільш доцільного джерела енергії, дозволяє підвищити світлову ефективність освітлювального приладу принаймні на 20% з використанням лише промислово впровадженої еле-

ментної бази. За розрахунками, лише одна подібна система потужністю 250 Вт може заощадити до 2 тис. кВт·год електроенергії на рік. В Україні ж щорічно вводиться в експлуатацію понад 1 млн м² промислових приміщень, що потребують якісного освітлення, і якщо навіть у незначній частині з них використовувати потужні світлодіодні системи з комбінованим електроживленням, це може становити десятки тисяч таких освітлювальних приладів на рік з відповідним економічним ефектом. При цьому найвищий економічний та екологічний ефект матимуть освітлювальні системи високої (100—200 Вт) та надвисокої (понад 200 Вт) потужності, призначених для освітлення приміщень великої площі: об'єктів промисловості, приміщень заводів, ангарів для техніки, зерно-овочесховищ, теплиць, приміщень торговельних центрів, спортивних залів, офісів відкритого типу, об'єктів спеціального призначення та інших приміщень великих розмірів.

Використання сонячної енергії для живлення потужних світлодіодних освітлювальних приладів дозволить при широкому впровадженні таких систем в промисловості значно знизити споживання електроенергії з централізованої електромережі, а значить, скоротити використання органічних видів палива на виробництво електроенергії та зменшити кількість шкідливих викидів в атмосферу. До того ж відмова від традиційних накопичувачів електроенергії (акумуляторів) в конструкціях освітлювальних систем з комбінованим електроживленням значно збільшує їхній термін експлуатації, надійність та вплив на екологію.

Розміщення фотоелектричних перетворювачів в безпосередній близькості від споживачів — на дахах і фасадах будівель, а також безпосереднє використання генерованої енергії зменшує омічні втрати й підвищує економічну та енергетичну ефективність таких систем.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Lishik S. I., Posedko V. S., Trofimov Yu. V., Tsvirko V. I. Current state, trends and perspectives of the development of light emitting diode technology. *Light & Engineering*, 2017, vol. 25, iss. 2, pp.13–24.
2. CITIZEN ELECTRONICS CO., LTD. http://ce.citizen.co.jp/lighting_led/dl_data/datasheet/en/COB_8/CLU04J-1818C9_0355P_201906_202007.pdf (дата звернення: 28.10.2020)
3. Zohuri B. *Heat pipe design and technology: modern applications for practical thermal management*. Cham, Springer International Publishing, 2016, 537 p.
4. *Buildings a source of enormous untapped efficiency potential*. <https://www.iea.org/topics/buildings/> (дата звернення: 28.10.2020)
5. Schneider Electric. *Каталог рішень по захисту та контролю навантажень*. https://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/cb/acti9/Acti9_solutions_ru.pdf (дата звернення: 28.10.2020)
6. *World energy scenarios: composing energy futures to 2050*. World Energy Council, 2013, 288 p.
7. *Perspectives on the grand energy transition/world energy council*. Issues Monitor, 2018, 126 p.
8. *World energy resources*. https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_resources (дата звернення Last accessed: 28.10.2020)
9. *World energy resources*. World Energy Council, 2016. 1028 p.

10. Костильов В.П., Саченко А.В. Напівпровідникова фотоенергетика: сучасний стан і актуальні напрями досліджень. *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*, 2018, вип. 53, с. 13–37.
11. Власюк Ю.С., Стефанишин Д.В. Про проблеми та перспективи малої гідроенергетики в Україні. *Математичне моделювання в економіці*, 2018, № 1, с. 126–138.
12. *GLOBAL Wind Energy Outlook*. 2016. https://www.researchgate.net/publication/311774623_Global_Wind_Energy_Outlook_2016 (дата звернення Last accessed: 28.10.2020)
13. *Solar power Europe*. <https://www.solarpowereurope.org/national-energy-and-climate-plans-a-solar-powered-energy-system-by-2030/> (дата звернення: 28.10.2020)
14. *Solar resource maps*. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/> (дата звернення: 28.10.2020)
15. *Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти: колективна монографія*. За заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченка, В. І. Аранчій. Полтава, ПП “Астрія”, 2019, 603 с.
16. Возняк О. Т., Янів М. С. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 2010, № 664: Теорія і практика будівництва, с. 7–10.
17. *On-line калькулятор солнечной, ветровой и тепловой энергии*. <https://www.helios-house.ru/on-line-kalkulyator.html> (дата звернення: 28.10.2020)
18. Pekur D.V., Nikolaenko Yu.E., Sorokin V.M. Optimization of the cooling system design for a compact high-power LED luminaire. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2020, vol. 23, no. 1, p. 91–101.
19. Pekur D.V., Sorokin V.M., Nikolaenko Yu.E. Thermal characteristics of a compact LED luminaire with a cooling system based on heat pipes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 18, art. no. 100549.
20. Пекур Д.В., Сорокін В.М., Ніколаєнко Ю. Є. Експериментальне дослідження компактної системи охолодження з тепловими трубами для потужної світлодіодної матриці. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2020, №3–4, с. 35–41. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2020.3-4.35>
21. *ДТЕК Київські електромережі*. <https://www.dtek-kem.com.ua/ua/services-tariffs/> (дата звернення: 28.10.2020)

Дата надходження рукопису
до редакції 23.11 2020 р.

DOI: 10.15222/ТКЕА2020.5-6.03
УДК 628.931

К. т. н. Ю. В. КОЛОМЗАРОВ¹, д. ф.-м. н. В. П. КОСТЫЛЁВ¹,
д. т. н. В. М. СОРОКИН¹, д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО²,
И. В. ПЕКУР¹, к. т. н. В. И. КОРНАГА¹, к. т. н. Р. М. КОРКИШКО¹

Украина, г. Киев, ¹Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарева НАН Украины,

²Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт
имени Игоря Сикорского»

E-mail: kolomzarov@yahoo.com,
vsorokin@isp.kiev.ua, yunikola@ukr.net

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С КОМБИНИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЕМ

Использование светодиодных технологий для создания комфортной световой среды для жизни и труда человека позволяет уменьшить потребление электроэнергии при сохранении, а зачастую и улучшении, энергетических и спектральных параметров осветительных систем. В то же время питание светодиодных систем освещения жилых и промышленных зданий обычно осуществляется за счет использования электроэнергии, генерируемой в основном тепловыми электростанциями, которые для обеспечения своей работы используют преимущественно органические виды топлива, а их сжигание приводит к загрязнению окружающей среды.

В работе предложена концепция осветительной системы, в которой позитивное влияние на экологическое состояние окружающей среды достигается уменьшением энергопотребления осветительных систем за счет использования возобновляемых источников энергии. Алгоритм работы системы управления питанием светодиодного источника света позволяет сделать рациональный выбор источника энергии в режиме реального времени, что повышает световую эффективность светильника по крайней мере на 20% при использовании промышленно внедренной элементной базы. Кроме этого, предложенная схема питания предусматривает отказ от традиционных накопителей электроэнергии (аккумуляторов), что значительно увеличивает сроки эксплуатации таких систем, их надежность и экологическую безопасность, а размещение фотоэлектрических преобразователей в непосредственной близости к потребителю — на крышах и фасадах зданий позволяет уменьшить омические потери и создает благоприятные условия для использования солнечной энергии для освещения помещений с помощью светодиодных светильников. Все это позволяет значительно повысить экономическую и энергетическую эффективность таких систем.

Ключевые слова: системы освещения, солнечная энергетика, световая эффективность, фотопреобразователи солнечной энергии.

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.03
UDC 628.931

Yu. V. KOLOMZAROV¹, V. P. KOSTILOV¹,
V. M. SOROKIN¹, Yu. E. NIKOLAENKO²,
I. V. PEKUR¹, V. I. KORNAKA¹, R. M. KORKISHKO¹

Ukraine, ¹V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine,
²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
E-mail: kolomzarov@yahoo.com, vsorokin@isp.kiev.ua, yunikola@ukr.net

ENVIRONMENTAL ISSUES OF LIGHTING AND PROSPECTS OF ENERGY-SAVING LED LIGHTING SYSTEMS WITH COMBINED POWER SUPPLY

Using LED technologies to create a comfortable light environment for human life and work can help reduce electricity consumption while maintaining, and usually improving, the energy and spectral parameters of lighting systems. At the same time, LED lighting systems for residential and industrial buildings are usually powered by electricity generated mainly by thermal power plants. Such plants mostly use fossil fuels and their combustion leads to environmental pollution. The article proposes the concept of a lighting system, which allows improving the ecology by reducing the energy consumption of lighting systems through the use of renewable energy sources. The proposed operation algorithm of the system for power supply control of LED light sources allows selecting the most appropriate energy sources in real time, thus making it possible to increase the luminous efficiency of the lamp by at least 20% when using industrial element base. This design can help to move away from traditional energy storage systems (batteries), which significantly increases the service life of such systems, their reliability and environmental safety. Placing photovoltaic converters in close proximity to the consumer (on the roofs and facades of buildings) ensures a decrease in ohmic losses and creates favorable conditions for using solar energy to light residential and industrial premises with LED lamps, which can significantly increase the economic and energy efficiency of such systems.

Keywords: lighting systems, solar energy, light efficiency, photoconverters of solar energy.

REFERENCES

1. Lishik S. I., Posedko V. S., Trofimov Yu. V., Tsvirko V. I. Current state, trends and perspectives of the development of Light Emitting Diode technology. *Light & Engineering*, 2017, vol. 25, iss. 2, pp. 13–24.
2. CITIZEN ELECTRONICS CO., LTD. http://ce.citizen.co.jp/lighting_led/dl_data/datasheet/en/COB_8/CLU04J-1818C9_0355P_201906_202007.pdf (accessed date: 28.10.2020)
3. Zohuri B. *Heat pipe design and technology: modern applications for practical thermal management*. Cham, Springer International Publishing, 2016, 537 p.
4. *Buildings A source of enormous untapped efficiency potential*. <https://www.iea.org/topics/buildings/> (accessed date: 28.10.2020)
5. Schneider Electric. [Load protection and control solutions catalog]. https://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/cb/acti9/Acti9_solutions_ru.pdf (accessed date: 28.10.2020) (Rus)
6. *World Energy Scenarios: Composing energy futures to 2050*. World Energy Council, 2013, 288 p.
7. Perspectives on the Grand Energy Transition/World Energy Council. *Issues Monitor*, 2018, 126 p.
8. *World Energy Resources*. https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_resources (accessed date: 28.10.2020)
9. *World Energy Resources*. World Energy Council, 2016. 1028 p.
10. Kostylyov V. P., Sachenko A. V. Semiconductor photovoltaics: current state and actual directions of research. *Optoelectronics and Semiconductor Technique*, 2018, vol. 53, pp. 13–37. (Ukr)
11. Vlasjuk YU. S., Stefanyshyn D. V. [On the problems and prospects of small hydropower in Ukraine]. *Matematychni modelyuvannya v ekonomitsi*, 2018, no. 1, pp. 126–138. (Ukr)
12. *GLOBAL Wind Energy Outlook*. 2016. https://www.researchgate.net/publication/311774623_Global_Wind_Energy_Outlook_2016 (accessed date: 28.10.2020)
13. *SolarPower Europe*. <https://www.solarpowereurope.org/national-energy-and-climate-plans-a-solar-powered-energy-system-by-2030/> (accessed date: 28.10.2020)
14. *Solar Resource Maps*. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/> (accessed date: 28.10.2020)
15. Makarenko P. M., Kalinichenko O. V., Aranchiy V. I. (Eds.) *Enerhoefektyvnist' ta enerhozberezhennya: ekonomichnyy, tekhniko-tekhnolohichnyy ta ekolohichnyy aspekty: kolektyvna monohrafiya* [Energy efficiency and energy saving: economic, technical-technological and ecological aspects: collective monograph]. Poltava, PE "Astraya", 2019, 603 p. (Ukr)
16. Voznyak O. T., Yaniv M. Ye. [Energy potential of solar energy and prospects for its use in Ukraine]. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series Theory and Building Practice*, 2010, no. 664, pp. 7–10. (Ukr)
17. [On-line solar, wind and heat energy calculator]. <https://www.helios-house.ru/on-line-kalkulyator.html> (accessed date: 28.10.2020) (Ukr)
18. Pekur D. V., Nikolaenko Yu. E., Sorokin V. M. Optimization of the cooling system design for a compact high-power LED luminaire. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2020, vol. 23, no. 1, p. 91–101.
19. Pekur D. V., Sorokin V. M., Nikolaenko Yu. E. Thermal characteristics of a compact LED luminaire with a cooling system based on heat pipes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 18, art. no. 100549.
20. Pekur D. V., Sorokin V. M., Nikolaenko Yu. E. Experimental study of a compact cooling system with heat pipes for powerful LED matrices. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 3–4, pp. 35–41. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.3-4.35> (Ukr)
21. DTEK. Kyivsky Elektromerezhi. <https://www.dtek-kem.com.ua/ua/services-tariffs/> (accessed date: 28.10.2020)

Опис статті для цитування:

Коломзаров Ю. В., Костильов В. П., Сорокін В. М., Ніколаєнко Ю. С., Пекур І. В., Корнага В. І., Коркішко Р. М. Екологічні проблеми освітлення та перспективи застосування енергоощадних світлодіодних освітлювальних систем з комбінованим електроживленням. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2020, № 5–6, с. 3–9. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.03>

Cite the article as:

Kolomzarov Yu. V., Kostilov V. P., Sorokin V. M., Nikolaenko Yu. E., Kornaga V. I., Korkishko R. M., Pekur I. V. Environmental issues of lighting and prospects of energy-saving LED lighting systems with combined power supply. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 5–6, pp. 3–9. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.03>

К. ф.-м. н. В. Ф. МИТИН, В. В. ХОЛЕВЧУК, к. т. н. Е. А. СОЛОВЬЕВ,
А. Б. СИДНЕВ, д. ф.-м. н. Е. Ф. ВЕНГЕР

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

КРИОГЕННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК Ge–InP

Пленки Ge на InP(100) могут быть использованы для создания криогенных термометров сопротивления. Они обладают хорошей термочувствительностью и относительно малым магнетосопротивлением. Структура пленок является аморфной или поликристаллической с низким уровнем структурного совершенства. Пленки обладают малой подвижностью носителей заряда — порядка $7 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Погрешность при измерении температуры составляет 5% в магнитном поле 11 Тл при температуре 4,2 К и 14% в магнитном поле 14 Тл при температуре 2,2 К.

Ключевые слова: гетероструктура Ge–InP, сенсоры температуры, тонкие пленки, криогенные температуры, магнитное поле, измерение.

Наиболее распространенными в наше время рабочими средствами измерения температуры являются термопары, термометры сопротивления (металлические и полупроводниковые) и диодные сенсоры температуры. Обзор существующих измерительных преобразователей температуры, в частности для измерения низких температур, можно найти, например, в [1–3]. Как известно, магнитное поле сильно влияет на характеристики термопар, металлических резисторов и кремниевых диодов, делая их практически непригодными для измерения температуры в присутствии магнитного поля. Металлические резисторы и диодные сенсоры температуры также уступают полупроводниковым термометрам сопротивления по радиационной стойкости. Полупроводниковые же резистивные сенсоры температуры обладают малым магнетосопротивлением [4–9] и высокой стойкостью к радиации [7, 10–11].

Несмотря на то, что значительное количество научных исследований посвящены разработке криогенных термометров сопротивления, не так много таких термометров изготавливают серийно. В настоящее время для практической криогенной термометрии имеются на рынке и широко используются полупроводниковые термометры сопротивления, изготовленные из пленок оксинитрида циркония (0,1–300 К) [1, 3], композиционного углерода (1–420 К) [12], объемного и пленочного германия (0,03–400 К) [7–9, 13], а также оксида рутения (0,03–30 К) [1, 3].

Для создания криогенных термометров сопротивления могут быть использованы пленки Ge на InP(100), которые обладают хорошей термочувстви-

тельностью и относительно малым магнетосопротивлением. Постоянные решетки Ge и InP сильно отличаются (рассогласование составляет 3,9% [14]), причем у Ge она меньше, чем у InP, поэтому пленки Ge на InP должны находиться в состоянии растяжения. Их коэффициенты термического расширения также различны. Подложка InP разрушается при температуре больше 325°C, а значит проводить осаждение пленок методом испарения Ge в вакууме при температуре подложки выше 325°C нельзя [14], и поэтому структура пленок Ge на InP должна быть аморфной или иметь достаточно сильно несовершенную поликристаллическую структуру.

Целью данной работы было получение тонких (170–190 нм) пленок Ge на подложках из полуизолирующего InP методом испарения Ge в вакууме при критической температуре подложки 310°C, пригодных для получения криогенных термометров сопротивления, обладающих высокой температурной чувствительностью и относительно слабой чувствительностью к магнитному полю и способных работать в диапазоне температур 1,5–400 К.

Технология получения и методы исследования

Пленки осаждались методом термического испарения Ge в вакууме ($2 \cdot 10^{-4}$ Па) на подложки из полуизолирующего InP(100). Температура подложки T_0 в течение осаждения пленки составляла 310°C, скорость осаждения V была постоянна в процессе напыления, однако для получения различных пленок она варьировалась от 0,03 до 0,06 нм/с. Перед осаждением подложка подвергалась термообработке в вакууме при температуре 310°C в течение 15 мин. Перед осаждением все подложки обраба-

Авторы выражают глубокую благодарность П. М. Литвину и А. В. Кучику за обсуждение работы и полезные советы.

Условия осаждения и параметры пленок Ge (*p*-типа проводимости при 300 K)

Номер образца	T_0 , °C	V , нм/с	d , нм	ρ_{300} , Ом·см	p , 10^{18} см $^{-3}$	μ , см 2 /(В·с)	x	RMS, нм
1	310	0,03	190	0,187	3,4	7,5	0,8	2,25
2		0,061	170	0,324	4,6	6,5	0,7	2,6

тывались в травителе $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O} = 1:4$ в течение 2 мин. Толщина полученных пленок d варьировалась в пределах 170—190 нм. Пленки Ge обладали проводимостью *p*-типа, их удельное сопротивление составляло $\rho = 0,2\text{—}0,3$ Ом·см, концентрация дырок $p = (3\text{—}5) \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, холловская подвижность $\mu = 6,5\text{—}7,5$ см 2 /(В·с) при комнатной температуре. Условия осаждения и параметры пленок представлены в табл. 1.

Качество гетероструктуры Ge–InP определялась методом высокоразрешающей рентгеновской дифракции с использованием CuK_α , измерения проводились на дифрактометре Philips MRD. Наноморфология поверхности пленок Ge изучалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NanoScope IIIa в режиме периодического контакта с использованием кремниевое острья с номинальным радиусом 10 нм и углом при вершине 16°.

Электрические параметры пленок Ge определялись по проводимости, эффекту Холла и магнетосопротивлению, которые измерялись при комнатной температуре и индукции магнитного поля 2 Тл. Для определения низкотемпературной зависимости сопротивления были проведены измерения в интервале температур T от 2,0 до 300 К. Измерения магнетосопротивления проводились в сверхпроводящем магните, создававшем индукцию B до 11 Тл при 4,2 К и до 14 Тл при 2,2 К.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Кристаллическая структура и морфология поверхности

Как показали исследования дифракции рентгеновского излучения, полученные пленки Ge на InP обладают низким уровнем структурного совершенства. На рис. 1 представлены кривые качания для Ge–InP при разных скоростях роста (отражение 004). Для удобства проведения анализа пики германиевой пленки аппроксимированы гауссианами. Полуширина максимумов составляет 0,740° и 0,879° для образцов 1 и 2 соответственно. Уровень остаточных механических деформаций в образце 2 в два раза выше, чем в образце 1. Подложечный монокристалл InP частично находится в деформированном состоянии, о чем

свидетельствует выраженная асимметрия пика отражения X -лучей.

АСМ-изображения пленок приведены на рис. 2. Как видно, рельеф обоих образцов идентичен и состоит из массива плотно упакованных зерен с незначительным

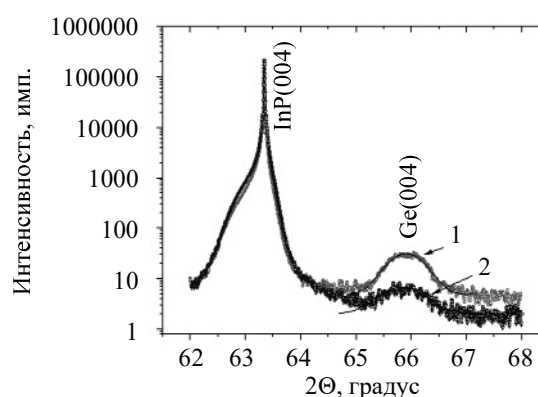


Рис. 1. Кривые дифракционного отражения (004) двух образцов пленок Ge–InP, полученных при разных скоростях роста (см. табл. 1)

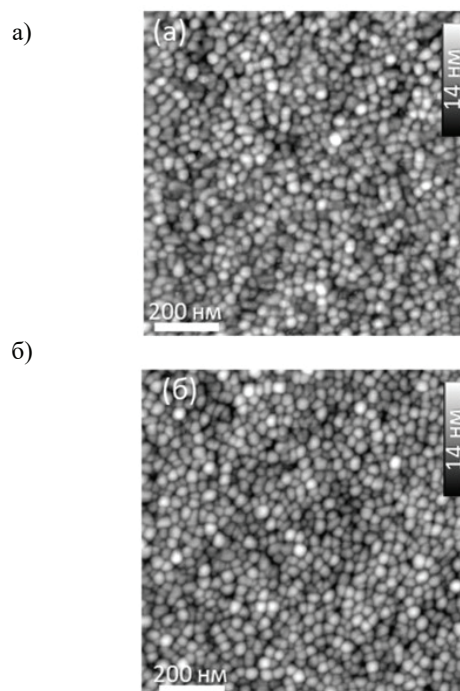


Рис. 2. АСМ-изображения фрагментов поверхности пленок Ge на InP образцов 1 (а) и 2 (б)

разбросом по размерам. Среднеквадратичная шероховатость RMS поверхности составляет 2,25 нм для образца 1 и 2,60 нм для образца 2 (на базовой площади 5×5 мкм). Зерна поверхности практически одинаковы для обоих образцов. Распределение по размерам имеет нормальный характер, максимум приходится на 13 нм, полуширина распределения находится в пределах 8—18 нм.

Электропроводность и магнетосопротивление

Низкая холловская подвижность μ в пленках подтверждала низкий уровень совершенства структуры.

Исследования показали сильную зависимость сопротивления пленок от температуры. Анализ приведенных на **рис. 3** результатов указывает на то, что температурная зависимость сопротивления в температурном диапазоне 2—25 К может быть описана выражением $\rho(T) = \rho_0(T)\exp[(T_x/T)^x]$, где $\rho_0(T) = AT^n$, T_x , A — параметры материала, величина x принимает значения от 0,7 до 0,8 для различных пленок (см. табл. 1). Полученные данные хорошо согласуются с известным фактом, что при низких температурах в неупорядоченных и легированных полупроводниках характер электропроводности является прыжковым.

Предварительные результаты по стабильности параметров экспериментальных образцов термометров показали, что при $T = 273,15$ К (0°C) стабильность лучше $\pm 0,1$ К, при $T = 77,4$ К лучше $\pm 0,02$ К, а при $T = 4,2$ К лучше $\pm 0,01$ К.

На **рис. 4** представлены типичные кривые магнетосопротивления в виде $\Delta\rho/\rho$ (где $\Delta\rho = \rho_B - \rho$ — разность между значениями сопротивления, измеренными в присутствии магнитного поля ρ_B и в его отсутствие ρ), полученные для термометров на основе пленок Ge на InP при 2,2 и 4,2 К. При проведении измерений термометры были расположены таким образом, что вектор магнитной индукции B был парал-

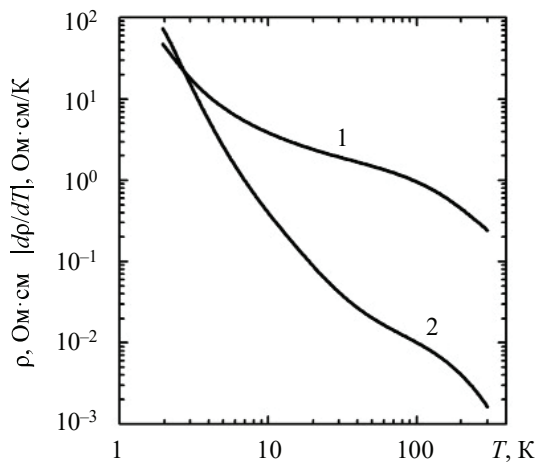


Рис. 3. Типичные температурные зависимости удельного сопротивления ρ (1) и термочувствительности dp/dT (2), полученные для пленки Ge на InP

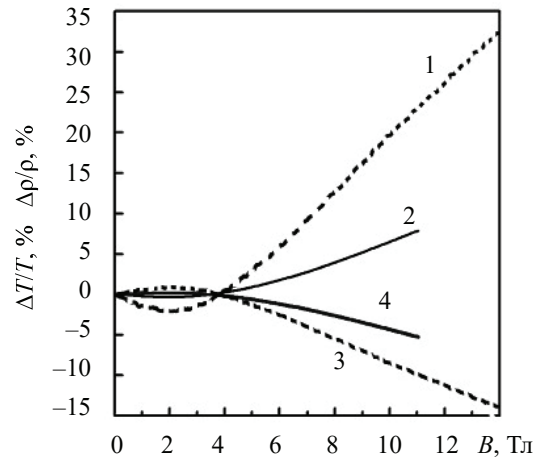


Рис. 4. Типичные зависимости магнетосопротивления $\Delta\rho/\rho$ (1, 2) и точности измерения температуры $\Delta T/T$ (3, 4) от магнитного поля, полученные для пленки Ge на InP при температурах 2,2 К (пунктир) и 4,2 К (сплошные)

Таблица 2

Точность измерения температуры при $T = 4,2$ К в зависимости от величины магнитного поля для различных резистивных сенсоров температуры

Сенсоры температуры	$\Delta T/T$, %, в магнитном поле (Тл)				
	2,5	4,0	6,0	8,0	14,0
Ge/InP	0,19	-0,1	-1,2	-2,6	—
SiC/Al ₂ O ₃ , TD#1 [15]	-0,5	-0,6	-2,0	-3,5	-8,8
Ge/GaAs, TTR-M [7]	0,5	0,5	-0,1	-1,3	—
ZrN _x O _y , Cernox™ [4]	0,11	0,2	—	-0,11	-0,85
Ge-bulk [9]	0,2	-0,03	-0,8	-1,9	-13,3
Carbon Ceramic, TVO [16, 17]	-0,5	-1,5	-3,9	-5,2	—
CrN/Si [5, 6]	0,04	0,04	0,05	0,08	—
CGR Carbon-Glass™ [18]	-0,5	—	—	-2,3	-4,9

лелен нормали n к плоскости пленки. Это исключало влияние направления вектора B на величину магнетосопротивления, которое может быть анизотропным, что требует дополнительных исследований.

Для исследуемых термометров магнетосопротивление отрицательно в магнитных полях до 3 Тл, пик приходится на примерно 1,8 Тл. С ростом магнитного поля магнетосопротивление проходит через ноль при 3,5 Тл и становится положительным. Точность в измерении температуры зависит не только от магнетосопротивления, но и от чувствительности сенсора. На рис. 4 кроме магнетосопротивления показана также зависимость точности измерения температуры $\Delta T/T$ (где $\Delta T = T_B - T$ — разность между значениями температуры, измеренными в присутствии магнитного поля T_B и в его отсутствие T) от величины магнитного поля: погрешность составляет 5% при измерении в магнитном поле 11 Тл при температуре 4,2 К и 14% в магнитном поле 14 Тл при температуре 2,2 К.

В табл. 2 приведены данные, указывающие на то, что для полученных пленок точность измерения температуры соответствует уровню характеристик широко используемых в настоящее время резистивных криогенных сенсоров, которые могут применяться в диапазоне от 2 К до комнатной температуры [4—7, 9, 15—18].

Выводы

Проведенные исследования показали, что пленки Ge на InP(100) могут быть использованы для создания криогенных термометров сопротивления в диапазоне температуры от 1,5 до 400 К. Структура полученных пленок Ge является поликристаллической с низким уровнем структурного совершенства, а среднеквадратичная шероховатость поверхности составляет 2,25—2,60 нм. Подвижность носителей заряда в пленках небольшая и составляет $7 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Пленки обладают хорошей термочувствительностью и относительно малым магнетосопротивлением и могут быть использованы для измерения криогенных температур в магнитных полях до 14 Тл.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rubin L.G. Cryogenic thermometry: a review of progress since 1982. *Cryogenics*, 1997, vol. 37, iss. 7, pp. 341–356. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(97\)00009-X](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(97)00009-X)
2. Childs P.R.N., Greenwood J.R., and Long C.A. Review of temperature measurement. *Review of Scientific Instruments*, 2000, vol. 71, iss. 8, pp. 2959. <https://doi.org/10.1063/1.1305516>
3. Yeager C.J., Courts S.S. A review of cryogenic thermometry and common temperature sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2001, vol. 1, iss. 4, pp. 352–360. <https://doi.org/10.1109/7361.983476>
4. Brant B.L., Liu D.W., Rubin L.G. Low temperature thermometry in high magnetic fields VII. Cernox sensors to 32 T. *Review of Scientific Instruments*, 1999, vol. 70, iss. 1, pp. 104. <https://doi.org/10.1063/1.1149549>

5. Yotsuya T., Kakehi Y., Ishida T. Thin film temperature sensor for cryogenic region with small magnetoresistance. *Cryogenics*, 2011, vol. 51, iss. 9, pp. 546–549. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.07.005>
6. Zhenzhen Hui, Qiumin Meng, Renhuai Wei et al. CrN thin films with ultra-low magnetoresistance prepared via solution processing for large-area applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 696, p. 844–849. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.048>
7. Mitin V.F., McDonald P.C., Pavese F. et al. Ge-on-GaAs film resistance thermometers for cryogenic applications. *Cryogenics*, 2007, vol. 47, iss. 9–10, pp. 474–482. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2007.04.014>
8. Mitin V.F., Kholevchuk V.V., Kolodych B.P. Ge-on-GaAs film resistance thermometers: Low-temperature conduction and magnetoresistance. *Cryogenics*, 2011, vol. 51, iss. 1, p. 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.11.003>
9. Zarubin L.I., Nemish I.Y., Szmyrka-Grzebyk A. Germanium resistance thermometers with low magnetoresistance. *Cryogenics*, 1990, vol. 30, iss. 6, p. 533–537. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0011-2275(90)90055-H)
10. Courts S.S. High level gamma radiation effects on Cernox TM cryogenic temperature sensors. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 278, 012076. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/278/1/012076>
11. Filippov Yu.P., Golikov V.V., Kulagin E.N., Shabratov V.G. Effects of high intensity cryogenic irradiation and magnetic field on temperature sensors. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1998; vol. 43, pp. 773. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4_96
12. Filippov Y.P., Smirnova T.I. Operation of the TVO temperature sensors in the range from 4.2 K up to 425 K. *Cryogenics*, 2004, vol. 44, iss. 10, pp. 735. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2004.04.002>
13. Courts S.S., Yeager C.J. Long term stability of germanium resistance thermometers. *AIP Conference Proceedings*, 2003, vol. 684, iss. 1, pp. 405. <https://doi.org/10.1063/1.1627159>
14. Madelung O. *Semiconductors: Data Handbook*, Springer, 2004.
15. Mitin V.F., Kholevchuk V.V., Semenov A.V. et al. Nanocrystalline SiC film thermistors for cryogenic applications. *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, 025004. <https://doi.org/10.1063/1.5024505>
16. Filippov Yu.P., Shabratov V.G. Measurement of helium temperatures by TVO-sensors under magnetic fields. *Cryogenics*, 2002, vol. 42, iss. 2, p. 127–131. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(02\)00016-4](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(02)00016-4)
17. Filippov Yu.P. How to find magneto-resistance of TVO temperature sensors in the range 0.1–10 K. *Cryogenics*, 2010, vol. 50, iss. 4, pp. 243–247. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.01.004>
18. Rubin L.G., Brant B.L., Sample H.H. Some practical solutions to measurement problems encountered at low temperatures and high magnetic fields. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1986, vol. 31, p. 1221–1230. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2213-9_136

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.09 2020 г.

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.10
UDC 621.315.596

V. F. MITIN, V. V. KHOLEVCHUK, E. A. SOLOVIEV,
A. B. SIDNEV, E. F. VENGER

Ukraine, Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine
E-mail: mitin@microsensor.com.ua

CRYOGENIC RESISTANCE THERMOMETERS BASED ON Ge–InP FILMS

Despite the large number of scientific articles devoted to the development of cryogenic resistance thermometers, not many of these thermometers are mass-produced. As is known, semiconductor resistive temperature sensors have low magnetoresistance and high resistance to radiation. The purpose of this work was to manufacture thin (170–190 nm) Ge films on semi-insulating InP substrates, which can be used to create cryogenic resistance thermometers with high temperature sensitivity and relatively low sensitivity to magnetic field that can operate in the 1.5–400 K temperature range.

Films of Ge on InP (100) can be used to produce cryogenic resistance thermometers. They have good thermal sensitivity and relatively low magnetoresistance.

The films were produced by thermal evaporation of Ge in vacuum ($2 \cdot 10^{-4}$ Pa) on semi-insulating InP (100) substrates. The temperature of the InP substrate during film deposition was 310°C , the deposition rate was also constant during sputtering, but varied in the range of 0.03 to 0.06 nm/s for different films. Ge films were p-type conductivity with a resistivity of $0.2\text{--}0.3 \Omega \cdot \text{cm}$, hole concentration $(3\text{--}5) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and Hall mobility $6.5\text{--}7.5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ at room temperature.

The quality of the Ge–InP heterostructure was determined by high-resolution X-ray diffraction on a Philips MRD diffractometer. The nanomorphology of the surface of Ge films was studied using the NanoScope IIIa atomic force microscope. The crystal structure of the films is amorphous or polycrystalline with a low level of structural perfection. The effective value of the surface roughness is from 2.25 to 2.60 nm.

The obtained resistance values at different temperature in the range of 2–25 K were described by exponential dependence. Corrections in temperature measurement are 5% in a magnetic field of 11 T at a temperature of 4.2 K and 14% in a magnetic field of 14 T at a temperature of 2.2 K.

The research results indicate that the obtained films can be used to measure cryogenic temperatures in magnetic fields of up to 14 T.

Keywords: Ge–InP heterostructure; temperature sensors; thin films, cryogenic temperatures, magnetic field, measurements.

REFERENCES

1. Rubin L.G. Cryogenic thermometry: a review of progress since 1982. *Cryogenics*, 1997, vol. 37, iss. 7, pp. 341–356. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(97\)00009-X](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(97)00009-X)
2. Childs P.R.N., Greenwood J.R., and Long C.A. Review of temperature measurement. *Review of Scientific Instruments*, 2000, vol. 71, iss. 8, pp. 2959. <https://doi.org/10.1063/1.1305516>
3. Yeager C.J., Courts S.S. A review of cryogenic thermometry and common temperature sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2001, vol. 1, iss. 4, pp. 352–360. <https://doi.org/10.1109/7361.983476>
4. Brant B.L., Liu D.W., Rubin L.G. Low temperature thermometry in high magnetic fields VII. Cernox sensors to 32 T. *Review of Scientific Instruments*, 1999, vol. 70, iss. 1, pp. 104. <https://doi.org/10.1063/1.1149549>
5. Yotsuya T., Kakehi Y., Ishida T. Thin film temperature sensor for cryogenic region with small magnetoresistance. *Cryogenics*, 2011, vol. 51, iss. 9, pp. 546–549. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2011.07.005>
6. Zhenzhen Hui, Qiumin Meng, Renhuai Wei et al. CrN thin films with ultra-low magnetoresistance prepared via solution processing for large-area applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 696, p. 844–849. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.048>
7. Mitin V.F., McDonald P.C., Pavese F. et al. Ge-on-GaAs film resistance thermometers for cryogenic applications. *Cryogenics*, 2007, vol. 47, iss. 9–10, pp. 474–482. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2007.04.014>
8. Mitin V.F., Kholevchuk V.V., Kolodych B.P. Ge-on-GaAs film resistance thermometers: Low-temperature conduction and magnetoresistance. *Cryogenics*, 2011, vol. 51, iss. 1, p. 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.11.003>
9. Zarubin L.I., Nemish I.Y., Szmyrka-Grzebyk A. Germanium resistance thermometers with low magnetoresistance. *Cryogenics*, 1990, vol. 30, iss. 6, p. 533–537. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0011-2275(90)90055-H)
10. Courts S.S. High level gamma radiation effects on Cernox TM cryogenic temperature sensors. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 278, 012076. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/278/1/012076>
11. Filippov Yu.P., Golikov V.V., Kulagin E.N., Shabratov V.G. Effects of high intensity cryogenic irradiation and magnetic field on temperature sensors. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1998, vol. 43, pp. 773. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9047-4_96
12. Filippov Y.P., Smirnova T.I. Operation of the TVO temperature sensors in the range from 4.2 K up to 425 K. *Cryogenics*, 2004, vol. 44, iss. 10, pp. 735. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2004.04.002>
13. Courts S.S., Yeager C.J. Long term stability of germanium resistance thermometers. *AIP Conference Proceedings*, 2003, vol. 684, iss. 1, p. 405. <https://doi.org/10.1063/1.1627159>
14. Madelung O. *Semiconductors: Data Handbook*, Springer, 2004.
15. Mitin V.F., Kholevchuk V.V., Semenov A.V. et al. Nanocrystalline SiC film thermistors for cryogenic applications. *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, 025004. <https://doi.org/10.1063/1.5024505>
16. Filippov Yu.P., Shabratov V.G. Measurement of helium temperatures by TVO-sensors under magnetic fields. *Cryogenics*, 2002, vol. 42, iss. 2, p. 127–131. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(02\)00016-4](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(02)00016-4)
17. Filippov Yu.P. How to find magneto-resistance of TVO temperature sensors in the range 0.1–10 K. *Cryogenics*, 2010, vol. 50, iss. 4, pp. 243–247. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2010.01.004>
18. Rubin L.G., Brant B.L., Sample H.H. Some practical solutions to measurement problems encountered at low temperatures and high magnetic fields. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1986, vol. 31, p. 1221–1230. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2213-9_136

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.10
УДК 621.315.596

В. Ф. МИТИН, В. В. ХОЛЕВЧУК, С. О. СОЛОВЬОВ,
О. Б. СІДНЄВ, Є. Ф. ВЕНГЕР

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

КРИОГЕННІ ТЕРМОМЕТРИ ОПОРУ НА ОСНОВІ ПЛІВОК Ge–InP

Попри значну кількість наукових статей, присвячених розробці криогенних термометрів опору, не так багато цих термометрів виготовляються серійно. Як відомо, напівпровідникові резистивні сенсори температури мають малий магнетопір і високу стійкість до радіації. Метою даної роботи було отримання тонких (170–190 нм) плівок Ge на підкладках з напівізолюючого InP, які можуть бути використані для створення криогенних термометрів опору з високою температурною чутливістю і відносно слабкою чутливістю до магнітного поля, придатних для вимірювань в діапазоні температур 1,5–400 K.

Плівки осаджувалися методом термічного випаровування Ge у вакуумі ($2 \cdot 10^{-4}$ Па) на підкладки з напівізолюючого InP (100). Температура підкладки InP протягом осадження плівки становила 310°C, швидкість осадження також була постійною протягом наплення, проте варіювалася в межах 0,03 — 0,06 нм/с для отримання різних плівок. Плівки Ge мали р-тип провідності, їхній питомий опір складав 0,2–0,3 Ом·см, концентрація дірок $(3–5) \cdot 10^{18}$ см⁻³, холлівська рухливість 6,5–7,5 см²/(В·с) за кімнатної температури.

Якість гетероструктури Ge–InP визначалася методом високороздільної рентгенівської дифракції на дифрактометрі Philips MRD. Наноморфологія поверхні плівок Ge вивчалася за допомогою атомно-силового мікроскопа NanoScope IIIa. Структура плівок — аморфна або полікристалічна з низьких рівнем структурної досконалості. Ефективне значення шорсткості поверхні — від 2,25 до 2,60 нм.

Отримані дані величини опору за різних значень температури у діапазоні 2–25 K було описано експоненціальною залежністю. Похибка вимірювань температури складає 5% у магнітному полі 11 Тл за температури 4,2 K та 14% у магнітному полі 14 Тл за температури 2,2 K.

Результати досліджень вказують на те, що отримані плівки можуть бути використані для вимірювання криогенних температур в магнітних полях до 14 Тл.

Ключові слова: гетероструктура Ge–InP, сенсори температури, тонкі плівки, криогенні температури, магнітне поле, вимірювання.

Описание статьи для цитирования:

Митин В. Ф., Холевчук В. В., Соловьев Е. А., Сиднев А. Б., Венгер Е. Ф. Криогенные термометры сопротивления на основе пленок Ge–InP. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2020, № 5–6, с. 10–15. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.10>

Cite the article as:

Mitin V. F., Kholevchuk V. V., Soloviev E. A., Sidnev A. B., Venger E. F. Cryogenic resistance thermometers based on Ge–InP films. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature, 2020, no. 5–6, pp. 10–15. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.10>

M. S. KUKURUDZIAK, O. P. ANDREEVA, V. M. LIPKA

Ukraine, Chernivtsi, Rhythm Optoelectronics Shareholding Company
E-mail: mykola.kukurudzyak@gmail.com

HIGH-RESISTIVITY *p*-TYPE SILICON-BASED *p-i-n* PHOTODIODE WITH HIGH RESPONSIVITY AT THE WAVELENGTH OF 1060 nm

*The paper presents the results of development, optimization and improvement of *p-i-n* photodiode technology based on high-resistance *p*-type silicon with increased responsivity at a wavelength of 1060 nm. The optimal material was selected and the technological modes optimal for solving the set task were established and worked out in the course of research.*

Keywords: photodiode, silicon, sensitivity, technological mode.

According to ISO 2047 [1], the near-infrared (IR) region of the spectrum of optical radiation is characterized by the spectral range from 780 to 3000 nm. Various primary transducers are used to detect infrared radiation in this region of spectrum.

To study the energy parameters of infrared radiation, cavity and flat heat flux converters are used [2], which are nonselective and have high inertia. Devices and thermoelectric transducers, which convert thermal energy into electricity, are widely used as sensors of thermal radiation [3]. Modules based on anisotropic thermocouples are responsive parts of heat receivers. Thermoelectrically homogeneous anisotropic single crystals can be used to directly convert thermal energy into electrical energy [4]. But, like cavity transducers, they are non-selective and have high inertia.

Semiconductor-based photodetectors with a spectral range of sensitivity corresponding to the above-mentioned spectral range are effective for solving the problem of radiometry of the near-IR region of the spectrum [5]. One of the basic materials used in this field of electronics is silicon. The spectral sensitivity range of silicon photodiodes is from 380 to 1100 nm with a peak spectral response wavelength of 800–900 nm. This spectral range is interesting because it is covered with most infrared lasers and LEDs with operating wavelengths of 850, 900, 950, 1060 nm [6].

Obviously, increasing the responsivity of photodiodes is a high-priority task, the solution of which offers ample scope for optoelectronic equipment that uses such photodiodes. In particular, there is a task to develop and produce photodiodes with modulation-flux high current monochromatic and pulse responsivity.

This work is dedicated to improving and testing the process that would provide photodiodes based on high-resistivity *p*-type silicon. Such photodiodes would simultaneously have an increased current monochromatic responsivity across the modulated flux ($f = 20 \pm 5$ kHz) at

the operating voltage $U_{op} = 30$ V and a pulse responsivity at the wavelength $\lambda = 1060$ nm (pulse duration $\tau = 500$ ns), at $U_{op} = 120$ V, namely, not less than 0.4 A/W.

We started by analyzing the parameters of high-responsivity silicon *p-i-n* photodiodes manufactured abroad. We established that products of Orion (PD 342, Russia) [7] and Sensors Inc. (BPX 65, USA) [8] to be the best in the field. It was found that despite the increasing need of the market for devices designed for $\lambda_{op} = 1060$ nm, Sensors Inc. produces low-voltage photodiodes operating at the wavelength of $\lambda_{op} = 850$ nm. And products of Orion Sc&PrCo have relatively high dark currents (up to 7 μ A) and capacitance of photodiodes (up to 20 pF) at low-current responsivity values (0.2 A/W), that cannot satisfy the needs of customers of the market in full. Thus, the analysis has shown that none of the known photodiodes meets the requirements listed in the purpose of this work.

The research was conducted simultaneously on two different materials. The first one (Si_1) is a *p*-type silicon with lifetime of minority charge carriers $\tau_1 = 1400$ μ s and resistivity $\rho_1 = 16$ kOhm. The second one (Si_2) had the following parameters: $\tau_2 = 1800$ μ s and ρ_2 changing from 14 kOhm at one end of the ingot to 25 kOhm at the other end of the ingot. The wafers made from the second ingot were monitored for resistance and launched into production as two different materials in order to collect statistics on the dependence of the parameters of obtained devices on the initial resistance of the material.

Methods of Measurements

Current monochromatic responsivity S_{λ} was controlled by the method of comparing responsivity of the investigated photodiode (PD) with the responsivity of the reference one, which was certified by the metrological department of the enterprise. Measurements were performed under illumination of the PD with a modulated radiation flux of $f_{mod} = 20$ kHz and a power of below $1 \cdot 10^{-3}$ W. Load resistance of the responsive

element (RE) was $R_L = 10 \text{ kOhm}$ and operating voltage $U_{op} = 30 \text{ V}$. Pulse responsivity S_p was controlled at pulse durations $\tau_p = 500 \text{ ns}$ and $U_{op} = 120 \text{ V}$. Both the emitter and the optical system were made to illuminate only one PD responsive element. A voltmeter was used to measure first the voltage of the photosignal at the output of the reference photodetector (U_{st}), and then, without changing the power supply mode of the emitter, the voltage at the output of the tested PD (U_i).

The current monochromatic and pulse responsivity of the i^{th} RE were calculated by the formulas:

$$S_{i,\lambda} = S_{\lambda, \text{st}} U_i / U_{st}; \quad (1)$$

$$S_{i,p} = S_{p, \text{st}} U_i / U_{st}, \quad (2)$$

where U_i is the photosignal voltage of the i^{th} RE of the tested PD;

U_{st} is the photovoltaic voltage of the reference PD;

$S_{\lambda, \text{st}}$, $S_{p, \text{st}}$ are current monochromatic and pulse responsivity of the reference PD.

Dark currents of the PD I_d were measured at the supply voltage of 120 V in accordance with GOST 17772-88, and their specific values were calculated by the formula [9]

$$I_{d, \text{spec}} = I_d / A_{RE}, \quad (3)$$

where A_{RE} is the area of the responsive element.

Experimental Details

The devices were manufactured using standard planar technology [10]. Parameters were regulated and technological modes were selected by optimizing and establishing the thermal operations that would ensure the required parameters.

Diffusion process is crucial in the technology of manufacturing semiconductor devices. To obtain the optimal concentration of non-basic charge carriers N_d , we performed two-stage diffusion from solid phosphorus sources.

After diffusion of phosphorus, the surface resistance ρ_s of the wafers, dark currents I_d , and resistivity S_p were monitored in order to inspect the wafers for quality and correct the technological process. The optimal values of ρ_s were experimentally established to be

$$2,7 \geq \rho_s \geq 2,5 \text{ Ohm/sm} \quad (4)$$

At $\rho_s \geq 2.7 \text{ Ohm/sm}$, increase in I_d was observed above the set values.

When relation (4) was true for silicon type Si_1 , values of S_{p1} at the level of $0.3—0.35 \text{ A/W}$ ($U_{op} = 120 \text{ V}$) were observed. For Si_2 silicon type, values S_{p2} were observed at the level of $0.34—0.37 \text{ A/W}$ ($U_{op} = 120 \text{ V}$). Si_2 material (14 kOhm) under these conditions had a reduced level of currents and S_{p2} at the level of $0.25—0.27 \text{ A/W}$ (0.3 A/W at the PD output) after the diffusion of phosphorus. For this reason, it was deemed advisable to test it any further.

To ensure the qualitative parameters of the PD, the optimal bohr diffusion modes were experimentally established for the maximum possible restoration of charge carriers lifetime, which was reduced during the previous thermal procedures.

Results and Discussion

Thus, the results of the study allowed establishing that the photodiodes based on the selected materials and manufactured by the proposed technology achieved the following responsivity values:

— for Si_1

$$S_{p1} = 0.36—0.39 \text{ A/W};$$

$$S_{\lambda 1} = 0.4—0.43 \text{ A/W};$$

$$I_{d, \text{spec}1} = 7—11 \text{ nA/mm}^2 (U_{op} = 120 \text{ V});$$

— for Si_2

$$S_{p2} = 0.38—0.42 \text{ A/W};$$

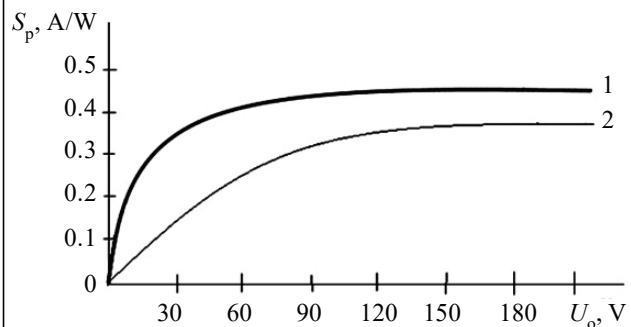
$$S_{\lambda 2} = 0.42—0.5 \text{ A/W};$$

$$I_{d, \text{spec}2} = 10—15 \text{ nA/mm}^2 (U_{op} = 120 \text{ V}).$$

As to the RE of the photodiode crystal, the maximum obtained value of the current monochromatic responsivity $S_{\lambda 2} = 0.52 \text{ A/W}$ was reached for Si_2 . The capacitance of the devices reached $11—15 \text{ pF}$ for Si_2 , while for silicon of the Si_1 type it was slightly higher, which is, of course, natural for a material with lower resistance.

The analysis of the results allowed establishing statistical relationship between S_p and S_{λ} . The devices with $S_p = 0.36—0.39 \text{ A/W}$ simultaneously provided $S_{\lambda} = 0.43—0.45 \text{ A/W}$, while the devices with $S_p = 0.4—0.43$ had $S_{\lambda} = 0.46—0.5 \text{ A/W}$.

The obtained averaged curve of the dependence of the current pulse monochromatic sensitivity on the operating voltage at the $p-n$ junction is shown in the figure. It illustrates that the sensitivity in a material with higher resistance is saturated at lower voltages than in one with lower resistance. The Si_2 -based devices with $\rho \approx 25 \text{ kOhm}$ reach the maximum sensitivity values at a voltage of $45—60 \text{ V}$. At $U_{op} = 60—120 \text{ V}$, the value of S_p remains unchanged. A slightly different pattern is



A graph showing the dependence of the current pulse monochromatic responsivity on the operating voltage at the $p-n$ junction obtained for silicon PDs with $\rho \leq 25 \text{ kOhm}$ (1) and $\rho = 16 \text{ kOhm}$ (2)

observed in Si₁ with $\rho_1 = 16$ kOhm. Here saturation is achieved at 80—100 V. This is explained by the fact that in a more resistive material, depletion of charge carriers in the *i*-region occurs faster, i.e., at lower voltages.

Heavy doping of the extreme n^+ and p^+ layers makes them conductive, and the maximum value of the electric current is reached in the *i*-layer. But since there are no free carriers in the *i*-layer, there is no electric current, so due to radiation of the *i*-layer, free electron-hole pairs are formed in it. These pairs quickly separate and move in opposite directions to their electrodes. As a rule, not all absorbed quanta of light create electron-hole pairs. In order to take this fact into account, one should use the measure of effectiveness of conversion of photons into electric current, or the so-called quantum efficiency (quantum yield) of the photodetector.

Quantum efficiency (output) of a photodiode is the ratio of the number of electrons born per second to the number of photons incident on the PD. Quantum efficiency (dimensionless quantity) is defined as [11]

$$\eta = \frac{N_e}{N_{ph}} = \frac{I_{ph} / e}{P / (h\nu)} = \frac{I_{ph} h\nu}{eP}, \quad (5)$$

where N_{ph} is the number of photons falling on the detector per unit time;

N_e is the number of free electrons (or electron-hole pairs) born as a result;

I_{ph} is photocurrent;

e is electron charge;

h is Planck constant;

ν is radiation frequency;

P is optical radiation power.

To create an electron-hole pair, the energy $h\nu$ of the absorbed quantum must be sufficient for the transition of an electron from the valence band to the conduction band, i.e., the condition $h\nu \geq E_g$ must be met. The current monochromatic sensitivity is defined as [12]

$$S_{\lambda} = \frac{\lambda}{1.234} \eta. \quad (6)$$

Given the maximum obtained value (for finished devices) $S_{\lambda} = 0,5$ A/W, we derive that $\eta \approx 58\%$. According to [11], this value is close to the theoretical limit.

Note that the radiation interaction is only effective in the *i*-layer. When photons hit the p^+ and n^+ layers, they

produce diffusion current, which has high inertia and impairs speed response.

That is why we manufactured the photodiodes with as wide a space charge region as possible, so that it could completely absorb all the incident light. After all, the obtained quantum efficiency, although approaching the theoretical one, is not the maximum value, and this result can still be improved.

REFERENCES

1. *Optics and photonics — Spectral bands*. ISO 20473: 2007. ISO Focus № 5, 2007, 72 p. (ISO standard). <https://www.iso.org/standard/39482.html>
2. Kmito A. A., Sklyarov Yu. A. *Pirgeliometriya* [Pyrgeliometry]. Leningrad, Gidrometizdat, 1981, 232 p. (Rus)
3. Pavlov A. V., Chernykov A. I. *Priyemniki izlucheniya avtomaticheskikh ustroystv* [Receivers of radiation of automatic devices]. Moscow, Energy, 1974, 274 p. (Rus)
4. Ashcheulov A. A., Snarsky A. A., Coats A. F. [Anisotropic thermocouples]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1997, vol. 31, no. 11, pp. 1281-1298. (Rus)
5. Verbytsky V. G., Vikulin I. M., Vorobienko P. P. et al. *Rozrobka vysokoefektyvnykh mikro-, nanotekhnolohiy optoelektroniky i komunikatsiynykh system na yikh osnovi* [Development of highly efficient micro-, nanotechnologies of optoelectronics and communication systems based on them]. Kyiv, LOGOS, 2009, 302 p. (Ukr)
6. Vigdorovich E. N. *Fizychni osnovy, konstruktsiya i tekhnolohiya optoelektronnykh prystroyiv* [Physical bases, design and technology of optoelectronic devices]. MGUP, 2011, 205 p. (Ukr)
7. *FD 342 Certificate*. Orion Scientific and Production Company. <http://www.orion-ir.ru/ru/product.html>
8. *BPX 65 photodiode certificate*. Sensors Inc. <http://www.digikey.com/product-detail/en/BPX%2065/BPX%2065-ND/2205355>
9. GOST 1772-88. [Radiation receivers. Semiconductor photovoltaic and photodetector devices. Methods of measuring photoelectric parameters and determination of characteristics]. Moscow. Izdatel'stvo standartov, 1988, 158 p. (Rus)
10. Filachev A. M., Taubkin I. I., Trishenkov M. A. [Solid state photoelectronics. Photodiodes]. Moscow, Fizmatkniga, 2011. (Rus)
11. Noikin Yu. M., Makhno P. V. *Fizicheskiye osnovy opticheskoy svyazi: elektronnoye uchebnoye posobiye* [Physical bases of optical communication: electronic textbook]. Rostov-on-Don, SFU, 2011, 355 p. (Rus)
12. P. K. Cheo. *Volokonnaya optika: Pribory i sistemy* [Fiber optics: Devices and systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1988, 280 p. (Rus)

Received 10.10 2020

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.16

М. С. КУКУРУДЗЯК, О. П. АНДРЕЄВА, В. М. ЛІПКА

UDC 535.23:628.98:535.31:621.383.52:537.312.51:631.382

Україна, м. Чернівці, ЦКБ «Ритм»

E-mail: mykola.kukurudzyak@gmail.com

***p-i-n*-ФОТОДИОД НА ОСНОВІ ВИСОКООМНОГО КРЕМНІЮ *p*-ТИПУ З ПІДВИЩЕНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ НА ДОВЖИНІ ХВИЛІ 1060 НМ**

Ефективними для вирішення завдань радіометрії ближньої ІЧ-області спектру — від 780 до 3000 нм — є фотоприймачі на основі напівпровідників, спектральний діапазон чутливості яких відповідає зазначеному спектральному діапазону. Попри потребу, на ринку відсутні фотодіоди з високою струмовою монохроматичною чутливістю на модульованому потоці та імпульсною чутливістю на довжині хвилі 1060 нм (не менше 0,4 А/Вт), які б характеризувалися низькими питомими темновими струмами та ємністю.

Одним з основних використовуваних матеріалів в цій галузі електроніки є кремній. Спектральний діапазон чутливості кремнієвих фотодіодів складає від 380 до 1100 нм з максимумом спектральної характеристики в області 800 — 900 нм. В цьому діапазоні працює більшість ІЧ-лазерів та світлодіодів.

У цій статті представлено результати розробки, оптимізації та вдосконалення технології *p-i-n*-фотодіоду на основі високоомного кремнію *p*-типу з підвищеною чутливістю на довжині хвилі 1060 нм. В процесі досліджень було підібрано матеріал з оптимальним рівнем часу життя неосновних носіїв заряду та опором. Встановлено і відпрацьовано технологічні режими, оптимальні для вирішення поставленої задачі.

Запропоновано режими дифузії фосфора, які дозволяють отримати оптимальні концентрації неосновних носіїв заряду. Для забезпечення якісних параметрів фотодіодів експериментально встановлено режими дифузії бора для максимального відновлення часу життя носіїв заряду, який знижувався під час термічних операцій.

Сформульовано основні критерії ширини n^+ - та p^+ -областей та області просторового заряду для повного поглинання випромінювання.

Отримано фотодіоди з підвищеною струмовою монохроматичною імпульсною чутливістю та чутливістю на модульованому потоці за умов забезпечення низьких рівнів темнових струмів та ємності фоточутливих елементів.

Досягнуто квантової ефективності порядку 58%, що наближається до теоретичної межі.

Ключові слова: фотодіод, кремній, чутливість, технологічний режим.

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.16

Н. С. КУКУРУДЗЯК, О. П. АНДРЕЄВА, В. Н. ЛІПКА

UDC 535.23:628.98:535.31:621.383.52:537.312.51:631.382

Україна, г. Черновцы, ЦКБ «Ритм»

E-mail: mykola.kukurudzyak@gmail.com

***p-i-n*-ФОТОДИОД НА ОСНОВЕ ВИСОКООМНОГО КРЕМНИЯ *p*-ТИПА С ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1060 НМ**

Представлены результаты разработки, оптимизации и улучшения технологии *p-i-n*-фотодиода на основе высокоомного кремния *p*-типа с повышенной чувствительностью на длине волны 1060 нм. В процессе исследований был подобран материал с оптимальным уровнем времени жизни неосновных носителей заряда и сопротивлением. Установлены и отработаны оптимальные для решения поставленных задач технологические режимы.

Предложены режимы диффузии фосфора, которые позволяют получить оптимальную концентрацию неосновных носителей заряда. Для обеспечения качественных параметров фотодиодов экспериментально установлены режимы диффузии бора для максимального восстановления времени жизни носителей заряда, который снижался в процессе проведения термических операций. Сформулированы основные критерии выбора ширины n^+ - и p^+ -областей и области пространственного заряда, соответствующей полному поглощению излучения.

Получены фотодиоды с повышенной токовой монохроматической импульсной чувствительностью и чувствительностью на модулированном потоке при обеспечении низких уровней темновых токов и емкости фоточувствительных элементов. Достигнута квантовая эффективность порядка 58%, что приближается к теоретическому пределу.

Ключевые слова: фотодиод, кремний, чувствительность, технологический режим.

Опис статті для цитування:

Kukurudziak M. S., Andreeva O. P., Lipka V. M. High-resistivity *p*-type silicon-based *p-i-n* photodiode with high responsivity at the wavelength of 1060 nm. Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2020, № 5–6, с. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.16>

Cite the article as:

Kukurudziak M. S., Andreeva O. P., Lipka V. M. High-resistivity *p*-type silicon-based *p-i-n* photodiode with high responsivity at the wavelength of 1060 nm. Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature, 2020, no. 5–6, pp. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.16>

К. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО

Украина, г. Киев, Научно-производственное предприятие «Сатурн»

E-mail: gen-nto@ukr.net

ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ СООСНЫХ СВЧ-СОЕДИНИТЕЛЕЙ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Проведен анализ принципов компоновки антенно-фидерных трактов современных радиоэлектронных систем с использованием СВЧ-соединителей и обоснована целесообразность создания новых типов специализированных СВЧ-соединителей. Рассмотрены преимущества, принцип реализации и конструкция СВЧ-соединителя врубного типа с гиперболическими контактами и приведены его основные технические параметры. Предложен вариант конструктивной реализации продольных волноводно-коаксиальных соединителей-трансформаторов и приведены их основные характеристики.

Ключевые слова: СВЧ, соединитель, волновод, коаксиальная линия, трансформатор, согласование, потери.

В СВЧ-диапазоне все антенно-фидерные тракты существующих радиоэлектронных систем (РЭС), как телекоммуникационных, так и радиотехнических, формируются из отдельных (локальных) автономных СВЧ-узлов или функциональных модулей, что требует специализированных СВЧ-соединителей разных типов. В зависимости от используемых типов линий передачи применяются волноводные, коаксиальные или комбинированные (волноводно-коаксиальные) соединители.

Необходимо отметить, что в современных РЭС автономные узлы и модули антенно-фидерных трактов в большинстве случаев реализуются в виде устройств, созданных на основе микрополосковых линий передачи (МПЛ) [1]. При этом используются разные типы подложек (керамические — ситал, 22ХС или поликор, или из органического диэлектрика — например, Duroid фирмы Rogers [2]), а устройства и модули имеют конструктивное планарное (горизонтально-плоское) исполнение [3]. Для интегральных СВЧ-устройств планарного типа в качестве элементов ввода/вывода сигнала наиболее перспективными представляются коаксиальные соединители и волноводно-коаксиальные переходы-трансформаторы продольного типа.

Многие современные РЭС создаются на базе антенных решеток типа АФАР (активная фазированная антенная решетка) или ЦААР (цифровая активная антенная решетка), когда для ввода/вывода СВЧ-сигнала необходимы особые специализированные соединители новых типов и конструктивных решений.

Целью настоящей публикации является повышение качества и надежности соосных соединителей — коаксиально-микрополосковых и волноводно-

коаксиальных соединителей-трансформаторов продольного типа.

Коаксиальные соединители

Все коаксиальные СВЧ-соединители представляют собой контактную пару в виде розетки и штыря, которые могут отличаться как конструкцией, так и типоразмером (обозначается D/d — соотношение диаметров наружного D (экранного) и внутреннего d (центрального токопроводящего) проводников коаксиала в миллиметрах). При этом все они имеют волновое сопротивление (импеданс) $Z = 50$ Ом и резьбовое (с гайкой) соединение для фиксации контакта.

Для всех коаксиальных СВЧ-соединителей любого типа и вида конструктивного исполнения основной характеристикой является реализация в максимально широкой полосе частот максимально возможного согласования (коэффициента стоячей волны по напряжению — КСВН) с минимальными вносимыми потерями G .

В настоящее время для интегральных СВЧ-модулей применяются коаксиальные соединители различных видов и модификаций [4] в виде блочного герметичного коаксиально-микрополоскового перехода (КМПП) и кабельной части. На рис. 1 приведены два типа КМПП: микротракт (СРГ-50-751) и SMA, а также два варианта их кабельной части.

Из рис. 1 видно, что блочные КМПП реализованы в виде гнезд (розеток), а кабельные части — в виде штырей (вилки). Характерные параметры некоторых известных КМПП приведены в табл. 1.

Как было отмечено выше, многие современные РЭС СВЧ-диапазона реализуются на базе антенных решеток. Причем интегральные приемо-передающие

Таблица 1

Технические характеристики рассмотренных соединителей [4]

Параметр	Тип соединителя	
	Микротракт (СРН-50-751)	SMA
Волновое сопротивление, Ом	50,0	
Диапазон рабочих частот, ГГц	0 — 12,0	2,0 — 18,0
Максимальный КСВН	1,8	1,5
СВЧ-потери, G , не более, дБ	0,1	
Типоразмер канала, D/d , мм	3,5/1,52	
Количество сочленений-расчленений	500	

становление функционирования. Именно это и предопределило необходимость создания коаксиально-микрополоскового СВЧ-соединителя врубного типа.

Следует отметить, что попытки реализовать подобный соединитель неоднократно предпринимались и ранее. Все они создавались на основе цанговых контактов, это, например, SERIES MODULE фирмы INTERTRONICS CORPORATION или отечественные «ШВР» ВР0.364.018 ТУ (коаксиал с каналом типоразмером 6/2,6 мм). Именно из-за цанговых контактов они имели ограниченный диапазон рабочих частот (менее 4,0 ГГц), недостаточную надежность (наработка на отказ — не более 250 сочленений/расчленений), и поэтому широкого применения не нашли.

Принципиально иной подход к реализации СВЧ-соединителя врубного типа описан в [5], где было предложено применять гиперboloидные пружинящие гнезда для обеспечения надежного контакта — как наружного (экранного), так и внутреннего (центрального токопроводящего) — проводников коаксиала. Именно особенности формы гиперboloида позволили реализовать СВЧ-соединитель врубного типа.

Однополостной гиперboloид (рис. 2) является трехмерной поверхностью второго порядка, образованной вращением математической гиперболы вокруг мнимой оси. К каждой точке этой гиперболы, а соответственно, и гиперboloида можно провести касательную и нормаль.

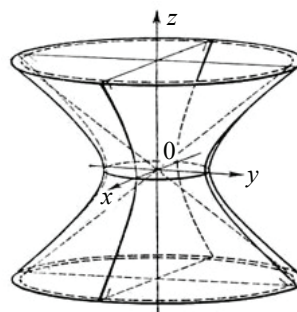


Рис. 2. Однополостной гиперboloид

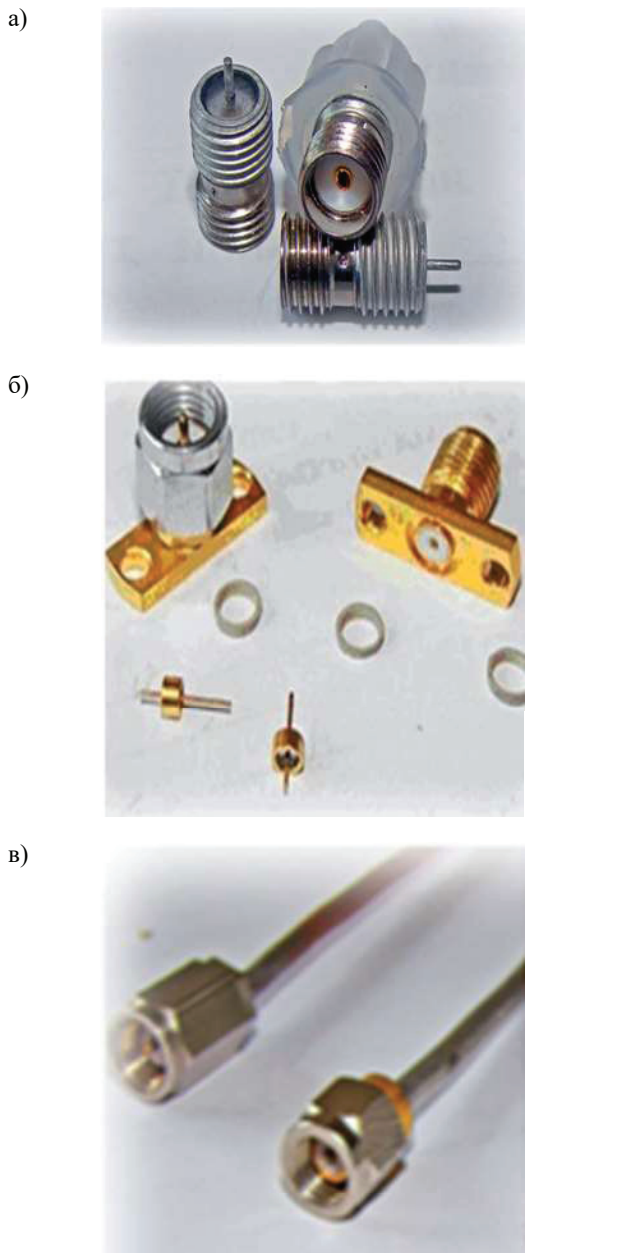


Рис. 1. Коаксиально-микрополосковые соединители (а — микротракт, б — SMA) и два варианта их кабельной части (в)

функциональные модули АФАР или ЦААР имеют продольный планарный конструктив (развиваются в длину при фиксированных ширине и высоте). В случаях, когда нарушается работоспособность антенной решетки, всегда необходимо максимально быстро восстановить режим ввода/вывода сигнала приемо-передающих модулей, подключив новые модули к антенным элементам-излучателям. Однако использование здесь известных СВЧ-соединителей с резьбовым соединением существенно усложняет (а иногда и исключает) реализацию такой задачи. Аналогичная проблема возникает и при эксплуатации телекоммуникационных систем для мобильной связи, когда также требуется максимально быстрое вос-

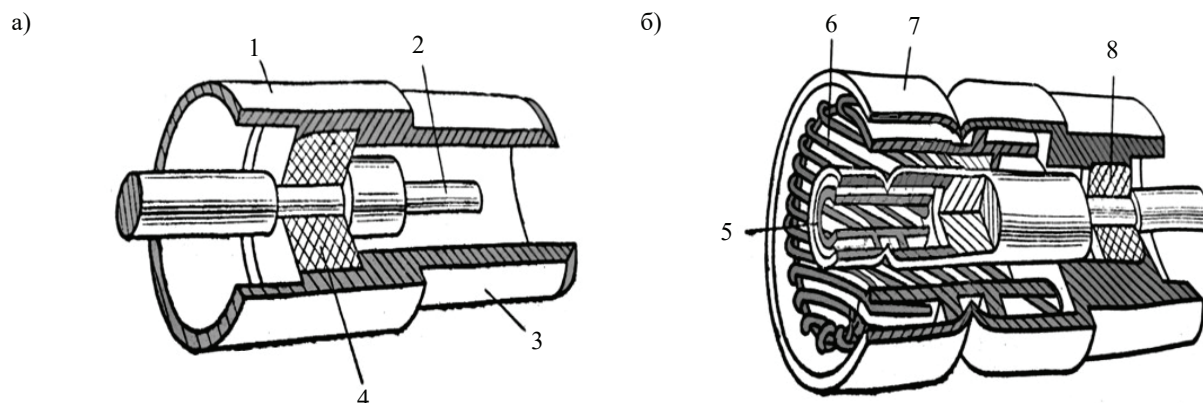


Рис. 3. Часть коаксиального соединителя со штыревыми контактами (а) и часть с гиперболическими гнездовыми контактами (б):

1, 7 — корпус; 2, 3 — внутренний и наружный контакты; 4, 8 — опорные изолирующие шайбы; 5, 6 — внутреннее и наружное гиперболические гнезда

Суть предложенного в [5] технического решения коаксиального СВЧ-соединителя станет понятна из рассмотрения **рис. 3**.

Часть коаксиального соединителя со штыревыми контактами состоит из корпуса 1, который содержит внутренний 2 и наружный 3 контакты. Внутренний контакт фиксируется внутри корпуса с помощью опорной изолирующей шайбы 4.

В корпусе 7 части соединителя с гнездовыми контактами размещены внутреннее гиперболическое гнездо 5 и наружное 6. Внутреннее гнездо фиксируется с помощью опорной изолирующей шайбы 8.

При сочленении гнездовой и штыревой частей наружное гиперболическое гнездо 6 плотно охватывает наружный штыревой контакт 3, образуя экранирующую поверхность (заземляющий проводник) коаксиального соединителя. Внутреннее гиперболическое гнездо 5 плотно охватывает внутренний штыревой контакт 2, образуя центральный (токопроводящий) проводник коаксиального соединителя. В результате получается регулярная коаксиальная линия.

Цельный пружинящий однополостной гиперболический изогнуть довольно сложно, поэтому в [5] было предложено сформировать гиперболическую поверхность, используя проволоку из пружинящего материала, например БрБ-2. При этом отрезки проволоки следует располагать относительно экранирующей или токопроводящего проводника коаксиала не параллельно, а под определенным углом, что обеспечивает одновременный контакт штыревой поверхности как минимум с четырьмя отрезками проволоки гиперболического гнезда. Такое решение гарантирует не только надежный контакт сочленяемых поверхностей, но и уменьшение уровня КСВН СВЧ-соединителя.

Изложенное выше легло в основу исследований реализации коаксиально-микрополосковых соединителей врубного типа.

Анализ эксплуатационных повреждений соединителя при сочленении/расчленении указывает на то, что наименее надежным элементом соединителя является гиперболическое гнездо токопроводящего проводника коаксиала. Поэтому в конструкцию, предложенную в [5], были внесены изменения.

Соединитель реализован в коаксиальном канале типоразмера 6/2,6 мм, поскольку в канале 3,5/1,52 мм сделать это не представляется возможным из-за размеров проводящих гнезд.

Блочный герметичный КМПП, сечение которого представлено на **рис. 4**, содержит гиперболическое гнездо для сочленения экранирующего проводника коаксиала соединителя и штыревой контакт, который является элементом центрального проводника коаксиала для сочленения с гиперболическим гнездом (розеткой) кабельной части. Кабельная часть соединителя с гиперболической розеткой центрального проводника коаксиала, представленная на **рис. 5**, имеет не цилиндрическую форму, а специфический профиль — выступ и выемку для фиксации при сочленении.

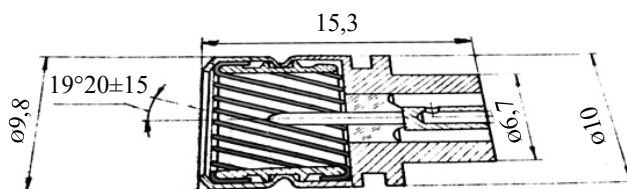


Рис. 4. Сечение блочного перехода с экранирующим гиперболическим гнездом

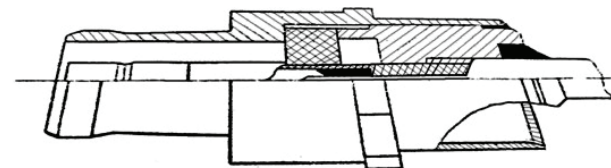


Рис. 5. Сечение кабельной розетки с гиперболическим гнездом центрального проводника

Таблица 2

Технические характеристики соединителей врубного типа

Наименование параметра	Значение
Волновое сопротивление, Ом	50,0
КСВН в полосе частот, МГц:	
100 — 4000	1,15
4000 — 6000	1,25
6000 — 1000	1,35
Потери в соединителе, дБ, не более, в полосе частот:	
100 — 6000 МГц	0,1
6 — 10 ГГц	0,2
Количество сочленений-расчленений при минимальной наработке 5000 ч	2000
Типоразмер коаксиального канала, мм	6/2,6

Приведенные технические решения были взяты за основу при разработке и изготовлении СВЧ-соединителя врубного типа, характеристики которого приведены в табл. 2.

Волноводно-коаксиальные соединители

Волноводно-коаксиальные соединители-трансформаторы продольного типа пока еще не имеют такого широкого применения, как рассмотренные выше коаксиально-микрополосковые соединители. Однако в современных антенно-фидерных трактах, образованных из СВЧ-модулей планарной конструкции, желательно и перспективно использовать именно волноводно-коаксиальные соединители. В таких СВЧ-устройствах предполагается преобразование электромагнитной волны регулярного волновода в волну коаксиальной линии в максимально широкой полосе частот при максимально достижимом согласовании (минимальном КСВН) с минимальными потерями.

Как отмечалось ранее, при горизонтальном (планарном) исполнении современных интегральных СВЧ-устройств наиболее перспективной представляется такая реализация продольно-соосного волноводно-коаксиального соединителя-трансформатора (ПСВКТ), когда ось коаксиала или интегральной линии передачи совпадает с геометрической осью волновода. Именно такое техническое решение не только создает существенные удобства при формировании антенно-фидерных трактов из отдельных СВЧ-устройств, но и способствует более эффективному преобразованию в более широкой полосе частот основного типа H_{10} электромагнитной волны регулярного волновода в волну трансверсально-электромагнитного (ТЕМ) типа коаксиальной линии с волновым сопротивлением (импедансом) $Z = 50$ Ом.

Принципы функционирования ПСВКТ удобнее всего рассматривать на конкретном примере известного соединителя — соосного волноводно-коаксиального перехода (ВКП) [6], продольный раз-

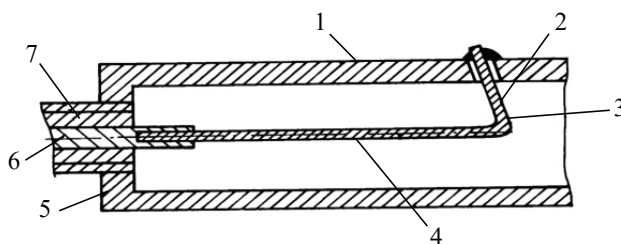


Рис. 6. Соосный коаксиально-волноводный переход:

1 — отрезок прямоугольного волновода; 2, 4 — зондовая и аксиальная части преобразующей системы 3; 5 — торцевая стенка; 6 — центральный токопроводящий проводник; 7 — отрезок коаксиальной линии

рез которого приведен на рис. 6. Такой соединитель содержит отрезок 1 прямоугольного волновода, который закорочен торцевой стенкой 5. Через отверстие в геометрическом центре торцевой стенки к волноводу подключен отрезок 7 коаксиальной линии. Преобразующая система 3 Г-образной формы, размещенная в полости волновода, является продолжением центрального токопроводящего проводника 6 отрезка 7 коаксиальной линии и состоит из аксиальной 4 и зондовой 2 частей. При этом зондовая часть припаяна к верхней широкой стенке отрезка 1 волновода.

Аксиальная часть 4 преобразующей системы 3 со стороны зондовой части 2 не зафиксирована в плоскости, которая проходит через продольную ось волновода и параллельна его узким стенкам. Ее длина составляет больше четверти длины ТЕМ-волны в коаксиале, а ее входное сопротивление имеет реактивную составляющую индуктивного характера. При этом зондовая часть 2 преобразующей системы при отклонении от упомянутой продольной плоскости создает реактивность емкостного характера. Изменение положения (угла отклонения) зондовой части 2 Г-образной преобразующей системы от продольно-осевой плоскости вызывает соответствующее изменение положения ее аксиальной части 4, что позволяет регулировать (компенсировать) фазовый сдвиг, вносимый таким ВКП в волноводный тракт.

Волновое сопротивление (импеданс) участка соединителя с волной типа ТЕМ должно равняться среднегеометрической величине импедансов коаксиальной линии и отрезка волновода. Импеданс СВЧ-коаксиальной линии имеет только незначительные отклонения от типового значения $Z = 50$ Ом и зависит от конструктивных особенностей. Поэтому степень согласования ВКП в основном зависит от величины импеданса волновода, что и определяет преимущество применения в аналогичных соединителях не регулярных прямоугольных волноводов, а волноводов более низкоомных (по значению импеданса) типов.

Рассмотренный вариант волноводно-коаксиального соединителя имеет достаточно простую конструкцию, обеспечивающую приемлемые основные электрические параметры. Например, для варианта с прямоугольным волноводом с размерами в попереч-

ном сечении 23×5 мм в полосе частот 21% достигнуто согласование $K_{СВН} \leq 1,2$ при прямых потерях не более 0,4 дБ.

Однако для достижения требуемых СВЧ-параметров в таком ВКП необходима индивидуальная профессиональная настройка. Кроме того, недостатком рассмотренного технического решения ВКП являются сложность и даже невозможность многократного воспроизведения устройства. Это связано с необходимостью точного обеспечения расчетной длины преобразующей системы Г-образной формы, с качеством и точностью ее пайки в широкую верхнюю стенку волновода, а также с соблюдением заданного соотношения между значениями длины аксиальной и зондовой частей преобразующей системы, угла между ними и ориентации относительно продольно-осевой плоскости волновода.

Особенности и недостатки рассмотренного основного ВКП не позволяют применять его для радиотехнических систем специального назначения. Выявление этих недостатков оказалось полезным при разработке новых надежных, серийнопригодных и воспроизводимых продольно-соосных волноводно-коаксиальных соединителей-трансформаторов с заданными СВЧ-параметрами. При создании новой конструкции ПСВКТ обязательно нужно было учитывать, что конструкция должна реализовываться на основе низкоомного волновода, имеющего не менее двух конструктивных элементов, позволяющих в волновом сопротивлении соединителя корректировать реактивную компоненту как индуктивного, так и емкостного характера. Рассмотрим вариант такого устройства, основой которого могут служить низкоомные П- или Н-образные волноводы [7]. Их поперечные сечения вместе с направлением вектора электрической компоненты электромагнитного поля E приведены на рис. 7.

Низкоомный П-образный волновод (рис. 7, а) содержит единственный конструктивный элемент для корректировки параметров устройства — ребро, размещенное в продольно-осевой плоскости волновода. При этом вектор E напряженности электромагнитного поля ориентирован перпендикулярно торцу этого ребра, а его максимум находится в зоне над ребром вблизи широкой верхней стенки волновода.

Низкоомный Н-образный волновод (рис. 7, б) содержит два конструктивных элемента для корректи-

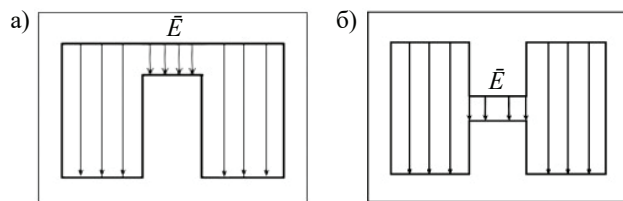


Рис. 7. П-образный (а) и Н-образный (б) волноводы в поперечном сечении

ровки параметров устройства — два ребра, размещенных в продольно-осевой плоскости волновода. При этом вектор E напряженности электромагнитного поля ориентирован перпендикулярно обоим торцам ребер волновода, а его максимум напряженности находится (сконцентрирован) в зоне щели между этими торцами. Именно этот фактор, а также наличие двух конструктивных элементов стали определяющими в пользу Н-образного волновода при выборе типа волновода для создания нового ПСВКТ.

Чтобы провести полноценный анализ процесса преобразования волны основного типа H_{10} регулярного волновода в волну ТЕМ-типа коаксиальной линии в созданном на базе Н-образного волновода варианте ПСВКТ, рассмотрим его продольно-осевой разрез, приведенный на рис. 8.

Отрезок 1 волновода с одного конца закорочен торцевой стенкой 2, через отверстие в геометрическом центре которой (в продольно-осевой плоскости волновода) к нему подключен отрезок 3 коаксиальной линии с импедансом $Z = 50$ Ом. На некотором расстоянии от закорачивающей стенки размещен согласующий элемент 6 преобразующей системы (из волны типа H_{10} в волну типа ТЕМ). Он выполнен в форме ребра двухступенчатой структуры, ориентированного симметрично относительно продольно-осевой плоскости волновода и равноудаленного от его узких боковых стенок.

Согласующий элемент 6 функционально аналогичен аксиальной части соосного ВКП (поз. 4 на рис. 6) и, соответственно, вносит в волновое сопротивление преобразующей системы реактивную составляющую индуктивного характера. При этом он объединен с отрезком 3 коаксиальной линии с помощью элемента связи 4, который является продолжением центрального токопроводящего проводника коаксиаль-

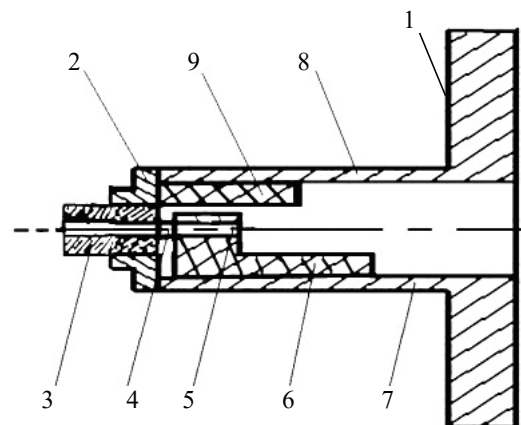


Рис. 8. Продольно-осевой разрез волноводно-коаксиального трансформатора:

1 — отрезок волновода; 2 — торцевая стенка; 3 — отрезок коаксиальной линии; 4 — элемент связи; 5 — отверстие; 6 — согласующий элемент преобразующей системы; 7, 8 — широкие стенки волновода; 9 — корректирующий элемент

Таблица 3

Технические характеристики некоторых реализованных ПСВКТ

Наименование параметра	Типоразмер волновода, мм	
	48×24	23×10
Диапазон рабочих частот, ГГц	3,8—4,6	9,0—10,0
Импеданс коаксиала, Ом	50	
Максимальный КСВН	1,12	1,16
СВЧ-потери, G , не более, дБ	0,1	
Типоразмер коаксиального канала, мм	6/2,6	3,5/1,52

ной линии. Элемент связи закреплен в отверстии 5, выполненном в стенке верхней части согласующего элемента 6 соосно с геометрическим центром закорачивающей торцевой стенки 2.

Ребристо-ступенчатая структура согласующего элемента ориентирована перпендикулярно к закорачивающей стенке 2 и широкой нижней стенке 7 волновода, с которой соединена неразрывно нижняя поверхность согласующего элемента.

Аналогом зондовой части соосного ВКП (поз. 2 на рис. 6) тут выступает корректирующий элемент 9. Он представляет собой параллелепипед, размещенный симметрично в продольно-осевой плоскости отрезка 1 волновода и равноудаленный от его узких боковых стенок. Как и зондовая часть соосного ВКП, он также вносит реактивную составляющую емкостного характера в волновое сопротивление преобразующей системы

Корректирующий элемент ориентирован перпендикулярно как к закорачивающей торцевой стенке волновода 2, так и к его широкой верхней стенке 8. Торцы корректирующего элемента неразрывно соединены с закорачивающей стенкой 2 и с широкой верхней стенкой 8 волновода. При этом нижняя поверхность корректирующего элемента находится на некотором расстоянии от верхней поверхности ступенчато-ребристой структуры согласующего элемента 6, образуя (как это видно из рис. 9) щель между ребрами Н-образного волновода, в которой имеет место максимум напряженности электромагнитного поля.

Толщина ребристо-ступенчатой структуры согласующего элемента должна быть больше диаметра выполненного в ней отверстия 6, и следовательно, она непосредственно определяется диаметром центрального проводника используемой коаксиальной линии. Именно размеры ребристо-ступенчатой структуры согласующего и корректирующего элементов преобразующей системы определяют уровень согласования импедансов отрезков волновода и коаксиальной линии такого ПСВКТ.

Преобразование импедансов от высокоомного регулярного волновода к низкоомной коаксиальной линии осуществляется за счет предложенной оригинальной конструкции ПСВКТ. Электромагнитная волна основного типа H_{10} прямоугольного волновода в ПСВКТ, последовательно распространяясь и одновременно преобразуясь в ТЕМ-волну, проходит че-

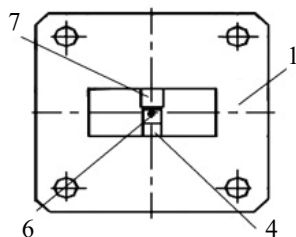


Рис. 9. Вид продольно-соосного соединителя со стороны открытого конца волновода

рез несколько участков с различным волновым сопротивлением: регулярный волновод, П-образный волновод, Н-образный волновод с коротким нижним гребнем, Н-образный волновод с высоким нижним гребнем и, наконец, коаксиал с волновым сопротивлением $Z = 50$ Ом.

Длина как нижней ступеньки согласующего элемента, так и корректирующего элемента, имеющего непосредственный контакт с закорачивающей торцевой стенкой волновода, определяется в соответствии с величиной четверти длины волны ТЕМ-типа коаксиальной линии. При этом в зоне элемента связи, являющегося центральным проводником коаксиала, будет распространяться волна, структура которой сходна с волной ТЕМ-типа коаксиальной линии. Кроме того, как было отмечено ранее, в этой зоне имеет место экстремальный максимум напряженности электромагнитного поля.

Рассмотренные особенности и принципы функционирования ПСВКТ предложенного варианта подтверждают, что цели создания такого устройства достигнуты:

- устройство является надежным и воспроизводимым благодаря жесткой конструкции;
- увеличение широкополосности предопределено применением Н-образного, а не прямоугольного волновода;
- компактность конструкции обеспечивается минимальной длиной согласующего элемента;
- потери минимальны, поскольку максимум электромагнитной волны приходится практически на коаксиальную линию в зоне элемента связи;
- улучшение уровня согласования входа/выхода устройства определяется оригинальной конструкцией преобразующей системы, реализованной на базе низкоомного Н-образного волновода.

ПСВКТ рассмотренной конструкции на основе волноводов с разными типоразмерами (диапазонами рабочих частот) были изготовлены и исследованы. Основные параметры некоторых ПСВКТ с не-

герметичними коаксиалами приведені в **табл. 3**. Предложений вариант технической реализации продольно-соосного волноводно-коаксиального трансформатора защищен правами интеллектуальной собственности [8].

Выводы

Рассмотренные в настоящей работе варианты конструктивной реализации коаксиально-микроволнового соединителя врубного типа и продольно-соосного волноводно-коаксиального соединителя-трансформатора были изготовлены, а их характеристики и особенности тщательно исследованы. Анализ результатов проведенных испытаний и измерений параметров позволяют утверждать, что предложенные технические решения надежны, воспроизводимы и серийнопригодны, их можно рекомендовать для применения в современных радиоэлектронных системах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. *Проектирование и расчет СВЧ-элементов на полосковых линиях*. Москва, Сов. радио, 1972, 276 с.
2. <http://roferscorporation.com/index.htm>
3. Чернушенко А.М. *Конструкции СВЧ-устройств и экранов*. Москва, Радио и связь, 1983.
4. Джуринский К.Б. *Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроволновой СВЧ*. Москва, Техносфера, 2006, 216 с.
5. Гладыш Ф.Л., Заикин Б.И., Карташев В.В., Ляшенко А.С. *Коаксиальный разъем*. А.с. СССР № 468325, 25.04.1975, бюл. № 15.
6. Тюрин Ю.В. *Соосный коаксиально-волноводный переход*. Пат. РФ № 2011245, опубл. 15.04.1994.
7. Шабунин С.Н., Соловьянова И.Н. *Волноводы и объемные резонаторы*. Оренбург, Уральский ГТУ, 1998, 38 с.
8. Глушеченко Е.М. *Поздновжньо-співвісний хвильоводно-коаксіальний трансформатор*. Пат. України на корисну модель № 142508, 10.06.2020, бюл. № 1.

Дата поступления рукописи
в редакцию 06.10.2020 г.

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.20
УДК 621.372.22

Е. М. ГЛУШЕЧЕНКО

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

ПРИНЦИПИ РЕАЛІЗАЦІЇ СПІВВІСНИХ НВЧ-З'ЄДНУВАЧІВ ДЛЯ СУЧАСНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

Багато сучасних РЕЗ створюються на базі антенних решіток типу АФАР (активна фазована антенна решітка) або ЦААР (цифрова активна антенна решітка), коли для введення/виведення НВЧ-сигналу необхідні особливі спеціалізовані з'єднувачі нових типів і конструктивних рішень. Метою даної роботи є підвищення якості та надійності коаксіально-мікросмужкових з'єднувачів і хвильоводно-коаксіальних з'єднувачів-трансформаторів поздовжнього типу.

У статті проведено аналіз принципів компонування антенно-фідерних трактів сучасних радіоелектронних систем із використанням НВЧ-з'єднувачів і обґрунтовано доцільність створення нових типів спеціалізованих НВЧ-з'єднувачів. Показано проблеми використання в антенних решітках відомих коаксіально-мікросмужкових з'єднувачів із нарізним з'єднанням.

Розглянуто принцип реалізації НВЧ-з'єднувача врубного типу з гіперболоїдними контактами та його переваги, а також конструкцію такого з'єднувача — блоковий коаксіально-мікросмужковий перехід і кабельну частину. Наведено основні технічні параметри НВЧ-з'єднувачів врубного типу. На основі аналізу переваг і недоліків відомого співвісного хвильоводно-коаксіального переходу сформовано вимоги для створення нових НВЧ-з'єднувачів цього типу. Запропоновано варіант конструктивної реалізації поздовжньо-співвісних хвильоводно-коаксіальних з'єднувачів-трансформаторів та наведено їхні основні характеристики.

Розглянуті варіанти конструктивної реалізації коаксіально-мікросмужкового з'єднувача врубного типу і поздовжньо-співвісного хвильоводно-коаксіального з'єднувача-трансформатора були виготовлені, а їхні характеристики ретельно досліджені. Аналіз результатів проведених випробувань і вимірювань параметрів дозволяє стверджувати, що запропоновані технічні рішення є надійними, відтворюваними та серийнопридатними, їх можна рекомендувати для застосування у сучасних радіоелектронних системах.

Ключові слова: НВЧ, з'єднувач, хвильовід, коаксіальна лінія, трансформатор, узгодження, втрати.

PRINCIPLES OF IMPLEMENTING COAXIAL MICROWAVE CONNECTORS
FOR MODERN RADIOELECTRONIC SYSTEMS

Many modern radioelectronic systems are based on antenna arrays such as APAA (active phased array antenna) or DAAR (digital active array antenna), which require specialized connectors of new types and design solutions for the input/output of the microwave signal. The aim of this work is to improve the performance and reliability of coaxial microstrip connectors and coaxial waveguide transformer connectors of longitudinal type.

The paper analyzes the arrangement principles of antenna feeders in modern radioelectronic systems with microwave connectors and substantiates the need to create new types of specialized microwave connectors. The authors demonstrate the issues that arise when using known coaxial microstrip connectors with threaded joints in antenna arrays. The paper considers the principles of implementing a cut-in microwave connector with hyperboloid contacts and its advantages, as well as the design of such a connector, i. e., the block coaxial microstrip transition and the cable part. The main technical parameters of cut-in microwave connectors are given. Using the analysis of the advantages and drawbacks of the known coaxial waveguide junction, the authors develop the requirements for the creating new microwave connectors of this type. The paper presents a design version of the longitudinal coaxial waveguide transformer connectors and their main characteristics. The considered design versions of the cut-in coaxial microstrip connector and the longitudinal coaxial waveguide transformer connector were manufactured and their characteristics were carefully studied. Analysis of the research results and measured parameters allow asserting that the proposed technical solutions are reliable, reproducible, can be mass produced, and thus can be recommended for use in modern radioelectronic systems.

Keywords: microwave, connector, waveguide, coaxial line, transformer, matching, losses.

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. (Rus)
2. <http://roferscorporation.com/index.htm>
3. Chernushenko A.M. *Konstruktsii SVCh-ustroystv i ekranov* [Designs of microwave devices and screens]. Moscow, Radio i svyaz', 1983. (Rus)
4. Dzhurinskiy K.B. *Miniaturnyye koaksial'nyye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCh* [Miniature coaxial radio components for microwave microelectronics]. Moscow, Tekhnosfera, 2006, 216 p. (Rus)

5. Gladyshev F.L., Zaikin B.I., Kartashev V.V., Lyashenko A.S. *Koaksial'nyy raz'yem* [Coaxial connector]. A.s. USSR no. 468325, 25.04.1975. (Rus)
6. Tyurin Yu.V. *Soosnyy koaksial'no-volnovodnyy perekhod*. [Coaxial coaxial-waveguide junction]. Pat. RF no. 2011245, 15.04.1994. (Rus)
7. Shabunin S.N., Solov'yanova I.N. *Volnovody i ob'yemnyye rezonatory* [Waveguides and cavity resonators]. Orenburg, Uralsky GTU, 1998, 38 p. (Rus)
8. Glushechenko E.M. *Pozdovzhn'o-spivvis'nyy khvylevodno-koaksial'nyy transformator* [Longitudinal-coaxial waveguide-coaxial transformer.], no. 142508, 10.06.2020. (Ukr)

Описание статьи для цитирования:

Глушеченко Э. Н. Принципы реализации соосных СВЧ-соединителей для современных радиоэлектронных систем. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2020, № 5–6, с. 20–27. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.20>

Cite the article as:

Glushechenko E. N. Principles of implementing coaxial microwave connectors for modern radioelectronic systems. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature, 2020, no. 5–6, pp. 20–27. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.20>

НОВІ КНИГИ

НОВІ КНИГИ

Дробахін О. О., Плаксін С. В., Рябчий В. Д., Салтиков Д. Ю. Техніка та напівпровідникова електроніка НВЧ : навчальний посібник.— Дніпро : ДНУ, 2018.

Наведено відомості стосовно основних ліній передачі НВЧ-діапазону, теорії мікрохвильових кіл. Розглянуто методи теорії довгих ліній та багатополосників НВЧ для аналізу і синтезу пристроїв на основі мікрохвильових ліній передачі. Наведено відомості про конструкції основних елементів НВЧ-техніки, їхні параметри, при цьому використано формалізм матриць розсіювання. Переважно розглянуто хвильові елементи, які застосовують для розв'язання задач прикладної фізики. Проаналізовано фізичні принципи роботи основних типів напівпровідникових і феритових пристроїв електроніки НВЧ. Надано основні теоретичні співвідношення та типові схеми для напівпровідникових генераторів, підсилювачів і перетворювачів частоти. Сформульовано критерії вибору оптимальних режимів їхньої роботи, визначено гранично можливі параметри та методи їхнього досягнення. Посібник містить тести для самостійної роботи. Нове видання доповнено відомостями про квазіоптичні лінії передачі та пристрої на їхній основі.

Для студентів, які навчаються за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали». Посібник також може бути корисним аспірантам і студентам старших курсів радіотехнічних і радіофізичних спеціальностей, а також всім, хто інтересується технікою НВЧ-діапазону.



Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ¹, Н. Я. ДЕРЕВЯНЧУК², Д. А. ЛАВРЕНЮК², к. т. н. И. С. РОМАНЮК³

Украина, г. Черновцы, Институт термоэлектричества¹, ЧНУ им. Ю. Федьковича², Завод «Кварц»³

E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru, m.derevianchuk@ukr.net

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА АНИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ СРЕДОЙ

Рассмотрены особенности распределения электрического тока в анизотропных электропроводных средах и установлены зависимости его продольной и поперечной составляющих от геометрических факторов. Показана возможность трансформации величины электрического тока и проанализированы основные методы ее оптимизации. Предложено два варианта конструкции анизотропных трансформаторов и проведена соответствующая оптимизация их коэффициента трансформации.

Ключевые слова: электропроводность, электрический ток, анизотропия, трансформатор, коэффициент трансформации.

В настоящее время согласование источников и потребителей электрической энергии переменного тока осуществляется с помощью трансформаторов. Работа этих устройств основана на явлениях электромагнитной индукции и трансформации [1]. Наряду с этим также известен и эффект электроомической трансформации, основанный на использовании особенностей поперечных эффектов анизотропных электропроводных сред [2]. Их применение позволило предложить новое поколение высокотоковых термоэлектрических преобразователей тепловой энергии, характеризующихся повышенными значениями коэффициента полезного действия.

В [3] представлена оригинальная конструкция трансформатора для внешнего источника постоянного электрического тока на основе прямоугольной пластины из анизотропного электропроводного материала, на определенных гранях которой выполнены соответствующим образом расположенные и электрически подключенные p - n -переходы. Экспериментальные исследования этого устройства показали, что его коэффициент трансформации может принимать значения как больше, так и меньше единицы, однако при этом наблюдается нелинейная зависимость между входными и выходными характеристиками, обусловленная влиянием p - n -переходов. Трансформация переменного электрического тока в этом случае невозможна.

В настоящей работе представлена физическая модель оригинального принципа трансформации переменного электрического тока с линейной зависимостью входных и выходных характеристик, позволяющая значительно расширить практические возможности в современной электроэнергетике, электронике, приборостроении, а также в других областях науки и техники.

Уравнение трансформации электрического тока в анизотропных электропроводных средах

В общем случае тензор электропроводности $\hat{\sigma}$ анизотропной электропроводной среды в условиях, когда его главные кристаллографические оси σ_{11} , σ_{22} и σ_{33} совпадают, соответственно, с осями OX , OY и OZ выбранной лабораторной системы координат XYZ , имеет следующий вид [4]:

$$\hat{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Если вектор внешнего электрического поля \vec{E} , накладываемый на среду, ориентирован вдоль какой-либо ее главной кристаллографической оси, например σ_{22} , которая совпадает с осью OY , то в объеме среды электрический ток возникает только в этом направлении:

$$\vec{J}_{yy} = \vec{E}_y \sigma_{22}, \quad (2)$$

в других кристаллографических направлениях среды ток не наблюдается.

Иная ситуация складывается в случае, когда вектор электрического поля располагается в плоскости, образованной кристаллографическими осями σ_{11} и σ_{22} , одна из которых, например σ_{11} , ориентирована под углом α к оси OX лабораторной системы координат (рис. 1, а). Такое размещение осей позволяет представить тензор $\hat{\sigma}$ в следующем виде:

$$\hat{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_{11}\cos^2\alpha + \sigma_{22}\sin^2\alpha & (\sigma_{11} - \sigma_{22})\sin\alpha\cos\alpha & 0 \\ (\sigma_{11} - \sigma_{22})\sin\alpha\cos\alpha & \sigma_{11}\sin^2\alpha + \sigma_{22}\cos^2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

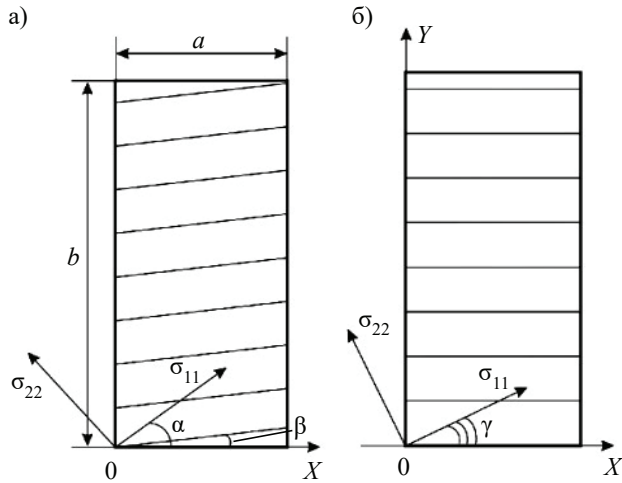


Рис. 1. Распределение линий плотности трансформированного электрического тока в объеме пластины при различной ориентации кристаллографических осей:

а) $\alpha = \alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$; б) $\gamma = 45^\circ - \beta$

В этом случае тензор электропроводности $\hat{\sigma}$ характеризуется наличием как продольной (σ_{\parallel}), так и поперечной (σ_{\perp}) составляющих.

Приложение с помощью внешних электродов электрического поля с напряженностью, направленной вдоль оси OY, приводит к появлению как продольной (\vec{j}_{yy}), так и поперечной (\vec{j}_{xx}) составляющих плотности векторов электрического тока:

$$\vec{j}_{yy} = \vec{E}_y (\sigma_{11} \cos^2 \alpha + \sigma_{22} \sin^2 \alpha); \quad (4)$$

$$\vec{j}_{xx} = \vec{E}_y (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \alpha \cos \alpha. \quad (5)$$

Оптимизация величин (4) и (5) по углу α — $\left(\frac{\partial j}{\partial \alpha} = 0; \frac{\partial^2 j}{\partial \alpha^2} < 0 \right)$ — показывает, что их максимальные значения наблюдаются при $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$, и в этом случае

$$\vec{j}_{yy} = 0,5 \cdot \vec{E}_y (\sigma_{11} + \sigma_{22}); \quad (6)$$

$$\vec{j}_{xx} = 0,5 \cdot \vec{E}_y (\sigma_{11} - \sigma_{22}). \quad (7)$$

Перейдем к рассмотрению прямоугольной пластины размерами $a \times b \times c$, выполненной из материала, который характеризуется анизотропией коэффициента электропроводности $\hat{\sigma}$, кристаллографические оси σ_{11} и σ_{22} которой размещены в плоскости ее боковой грани $a \times b$ (рис. 1, а), при этом одна из этих осей, например σ_{11} , ориентирована под углом $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$ к оси OX. Приложение к верхней и нижней граням ($a \times c$) некоторой разности потенциалов U_y вызывает протекание продольного (I_y) и поперечного (I_x) электрического тока:

$$I_y = U_y \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{\sigma_{11} \sigma_{22}} \cdot \frac{b}{ac}; \quad (8)$$

$$I_x = U_y \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} \sigma_{22}} \cdot \frac{a}{bc}. \quad (9)$$

Коэффициент трансформации такого устройства равен

$$n = \frac{I_x}{I_y} = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}} \cdot \frac{b^2}{a^2}. \quad (10)$$

Следует отметить, что в этом случае возможна трансформация как постоянного, так и переменного электрического тока.

При этом эквипотенциальные линии трансформированного тока I_x наложены под углом β (рис. 1, б), который определяется следующим образом:

$$\beta = \arctg \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}}. \quad (11)$$

Коэффициентом преобразования материала анизотропной пластины является величина $\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}}$, а коэффициентом ее формы — b/a .

Конструктивные особенности анизотропных трансформаторов переменного электрического тока

В общем случае выбор конкретной конструкции трансформатора на основе анизотропного электропроводного материала определяется как особенностями физических явлений, происходящих в нем, так и условиями его эксплуатации [5]. Один из возможных вариантов конструкции этого устройства, предназначенного для трансформации переменного электрического тока, приведен на рис. 2.

Основой этого устройства является трансформирующий элемент в виде прямоугольной пластины I размерами $a \times b \times c$ из анизотропного электропровод-

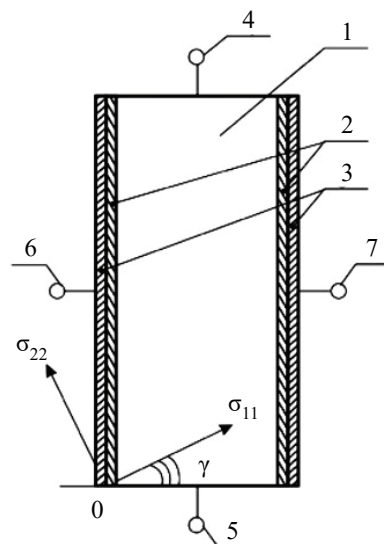


Рис. 2. Схематическая конструкция анизотропного трансформатора переменного электрического тока:

1 — анизотропная пластина; 2 — диэлектрический слой; 3 — электропроводящие слои; 4, 5 и 6, 7 — входные и выходные контакты соответственно

ного материала. Кристаллографические оси σ_{11} и σ_{22} расположены в плоскости ее грани $a \times b$, при этом ось σ_{11} располагается под углом $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$. Левая и правая грани $b \times c$ этой пластины содержат диэлектрические слои 2 с диэлектрической проницаемостью ε . Наружные стороны этих слоев, в свою очередь, содержат электропроводящие слои 3, к которым прикреплены выходные электрические выводы 6, 7. Входные электрические выводы 4, 5 располагаются на верхней и нижней торцевых гранях пластины ($a \times c$).

Такая конструкция трансформатора обеспечивает равномерное распределение трансформируемого электрического тока в объеме пластины 1 и предохраняет его от электрического шунтирования электропроводящими слоями 3.

Анализ распределения плотности трансформируемых токов в объеме пластины показал, что ориентация кристаллографической оси σ_{11} под углом $\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$ ведет к некоторому искажению их эквипотенциальности, а следовательно, и к уменьшению коэффициента трансформации. Чтобы этого избежать, ось σ_{11} необходимо ориентировать под углом $\gamma = \alpha_{\text{опт}} - \beta$ (рис. 1, б). В этом случае линии плотности трансформируемых токов искажаются, а величина коэффициента трансформации определяется следующим образом:

$$n_1 = \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \gamma \cos \gamma}{\sigma_{11} \cos^2 \gamma + \sigma_{22} \sin^2 \gamma} \cdot \frac{a}{b}. \quad (12)$$

Такое конструктивное решение позволяет устранить искажения распределения электрических токов в объеме пластины.

Эквивалентная схема электрического размещения этого устройства относительно входных электрических выводов 4 и 5 представляет собой активное по характеру сопротивление, величина которого равна

$$r_1 = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{\sigma_{11} \sigma_{22}} \cdot \frac{b}{ac}. \quad (13)$$

Его выходное сопротивление относительно выводов 6, 7 носит активно-емкостный характер, величина которого определяется как

$$Z = \sqrt{r_2^2 + \frac{1}{\omega^2 c^L}}, \quad (14)$$

где

$$r_2 = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} \sigma_{22}} \cdot \frac{a}{bc}; \quad (15)$$

$$c = \varepsilon \varepsilon_c \frac{bc}{2\Delta}; \quad (16)$$

$$\omega = 2\pi f;$$

Δ — толщина диэлектрического слоя;

f — частота трансформируемого тока.

Таким образом, рассматриваемое устройство обладает активным входным и активно-емкостным по характеру сопротивлениями и может использовать-

ся для трансформации только переменных электрических токов.

Для увеличения коэффициента трансформации устройства необходимо увеличивать размеры анизотропной электропроводной пластины, являющейся его основой, что значительно ограничивает его практическое применение.

Указанное ограничение снимается в конструкции трансформатора, представленной на рис. 3. Такое устройство состоит из трансформирующего элемента 1 — свернутой в спираль пластины, выполненной из анизотропного электропроводного материала, размерами $a \times b \times c$, на одну из поверхностей которой ($a \times b$) нанесен электроизолирующий слой 8 толщиной Δ_3 . Таким образом, трансформирующий элемент представляет собою диск высотой b внешним радиусом r_1 и внутренним r_2 . На верхнюю и нижнюю поверхности этого диска площадью $S = \pi(r_1^2 - r_2^2)$ нанесены диэлектрические слои 2 толщиной Δ_1 , на которые, в свою очередь, нанесены электропроводящие слои 3 толщиной Δ_2 . Входные электроконтакты 4, 5 располагаются, соответственно, на внутренней (r_2) и на внешней (r_1) сторонах спирали, выходные 6, 7 — на электропроводящих слоях 3 поверхностей диска.

При данной конструкции коэффициент трансформации n_3 устройства, длина пластины a и число витков N спирали связаны между собой следующими соотношениями:

$$a = \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{c + \Delta_3}; \quad (17)$$

$$N = \frac{\pi(r_1 - r_2)}{c + \Delta_3}; \quad (18)$$

$$n_2 = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{\sigma_{11} + \sigma_{22}} \cdot \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{b(c + \Delta_3)}. \quad (19)$$

Сравним геометрические размеры устройств, выполненных из анизотропной слоистой композиции на основе серебра и хрома, конструкции которых при-

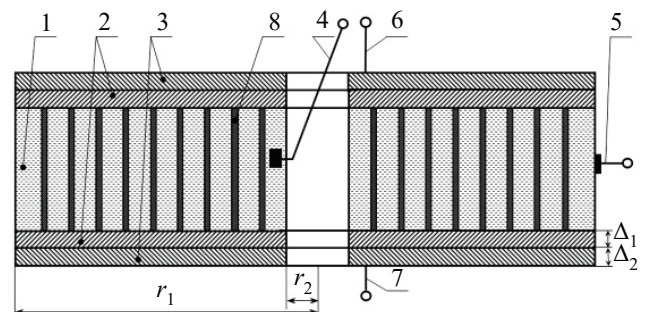


Рис. 3. Анизотропный электропроводный трансформатор: 1 — трансформирующая анизотропная электропроводная пластина, свернутая в спираль; 2 — диэлектрические слои; 3 — электропроводящие слои; 4, 5 и 6, 7 — входные и выходные контакты соответственно; 8 — межвитковый электроизоляционный слой толщиной Δ_3

ведені на рис. 2 і 3, при однакових значеннях коефіцієнта трансформації $n_1 = n_2 = 10^3$.

Для конструкції, представленної на рис. 2, значення $n_1 = 10^3$ забезпечується при довжині пластини $a = 2100$ мм, висоті $b = 2$ мм і ширині $c = 2$ мм. В разі спірального трансформуючого елемента, представленного на рис. 3, величина $n_2 = 10^3$ досягається при висоті диска $b = 2$ мм і зовнішньому радіусі $r_1 = 12,5$ мм (внутрішній $r_2 = 2$ мм, товщина міжвиткового електроізолюючого шару $\Delta_3 = 10^{-2}$ мм).

Як видно, спіральна конструкція трансформатора дозволяє значно зменшити його лінійні розміри при збереженні величини коефіцієнта трансформації.

В якості матеріалів для пластини можна використовувати як анізотропні монокристали на основі сполучень A_2B_5 відповідних евтектичних сплавів з $k = \sigma_{11}/\sigma_{22} = 1,8\text{—}5$ [6], так і штучно-анізотропні матеріали з $k = 10\text{—}100$, методика розрахунку яких наведена в [7]. Перспективні також високотемпературні надпровідні матеріали, характеризувані високим значенням анізотропії залишкового опору [8].

Висновок

Устройства на основе рассмотренного выше принципа электроомической трансформации могут использоваться в качестве согласующих элементов различных систем с широкополосными характеристиками,

а также узлов и блоков электроники, приборостроения, метрологии.

Вихревой характер электрических токов, протекающих в объеме анизотропных пластин, создает предпосылки для появления новых перспективных подходов к созданию измерительной техники, оригинальных генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Приведенный принцип трансформации расширит возможности их использования в различных областях науки и техники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Тамм И. Е. *Основы теории электричества*. Москва, Ленинград, ОГИЗ, 1946, 660 с.
2. Анатыхук Л. И. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства*. Киев, Наукова думка, 1979, 767 с.
3. Ащеулов А. А. и др. Преобразователь величины постоянного тока. А.с. 1512457 СССР, 1989, Б.и. №12.
4. Най Дж. *Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц*. Москва, Мир 1967, 286 с.
5. Ащеулов А. А. та ін. *Процес трансформації електрики*. Пат. №151258 України, 2020, бюл. № 6.
6. Маренкин С. Ф., Трухан В. М. *Фосфириды, арсениды цинка и кадмия*. Минск, НАН Беларуси, 2010, 227 с.
7. Герасченко О. А., Иорданишвили Е. К., Губкин Т. С. и др. Датчики теплового потока на основе искусственно-анизотропных термоэлектрических материалов. *ИФЖ*, 1978, т. 35, № 2, с. 228–233.
8. Tsuei C. C., Kirtley J. R. Pairing symmetry in cuprate superconductors. *Rev. Mod. Phys.*, 2000, vol. 72, iss. 4, pp. 969–1016. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.72.969>.

Дата поступления рукописи
в редакцию 18.08 2020 г.

УДК 537.29

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.28

А. А. АЩЕУЛОВ¹, М. Я. ДЕРЕВ'ЯНЧУК²,
Д. А. ЛАВРЕНЮК³, І. С. РОМАНЮК³

Україна, м. Чернівці, ¹Інститут термоелектрики,
²ЧНУ імені Юрія Федьковича, ³Завод «Кварц»

E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru, m.derevianchuk@ukr.net

ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ АНІЗОТРОПНИМ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Розглянуто особливості розподілу електричного струму в анізотропному електропровідному середовищі і встановлено залежності його поздовжньої та поперечної складових від геометричних факторів.

У випадку пластини прямокутної форми розміром $a \times b \times c$ кристалографічні осі розміщені в площині бічної грані $a \times b$, причому одну з цих осей орієнтовано під деяким кутом α до ребра a . Прикладання до верхньої і нижньої торцевих граней пластини деякої різниці потенціалів приводить до появи поздовжньої та поперечної складових внутрішнього електричного струму. Показано можливість трансформації величини електричного струму, а також спосіб оптимізації його величини.

Коефіцієнт трансформації такого пристрою визначається величиною анізотропії електропровідності матеріалу пластини та коефіцієнтом її форми $k = a/b$. Розглянуто декілька варіантів конструкції анізотропного діелектричного трансформатора та запропоновано їхні еквівалентні електричні схеми заміщення. Також запропоновано трансформатор спіралеподібної конструкції, який характеризується високим значенням коефіцієнта трансформації n при його малих лінійних розмірах. Наприклад, при висоті $b = 2$ мм та зовнішньому радіусі $r_1 = 12,5$ мм він характеризується коефіцієнтом трансформації $n = 10^3$.

Наведено інформацію про існуючі монокристалічні та штучні анізотропні матеріали, які можуть застосовуватися для запропонованого пристрою. Перспективними тут вбачаються високотемпературні надпровідні матеріали, що характеризуються високим значенням анізотропії залишкового опору.

Використання описаного ефекту трансформації дозволить значно розширити можливості практичного застосування розглянутого електроомічного явища, що призведе до появи нового покоління приладів та пристроїв для НВЧ-техніки, електроніки та електроенергетики.

Ключові слова: анізотропія, електропровідне середовище, електричний струм, трансформатор, коефіцієнт трансформації.

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.28
UDC 537.29

A. A. ASHCHEULOV¹, M. Ya. DEREVIANCHUK²,
D. A. LAVRENIUK², I. S. ROMANIUK³

Ukraine, Chernivtsi, ¹Institute of Thermoelectricity of NAS and MES of Ukraine,
²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, ³Plant "Quartz"
E-mail: ashcheulovaa@rambler.ru, m.derevianchuk@ukr.net

ELECTRIC CURRENT TRANSFORMATION BY ANISOTROPIC ELECTRICALLY CONDUCTIVE MEDIUM

The authors consider the aspects of electric current distribution in electrically conductive anisotropic medium and establish how geometrical factors affect its longitudinal and transverse components.

In the case of an $a \times b \times c$ rectangular plate, its selected crystallographic axes are located on the plane of the side face $a \times b$, whereas one of these axes is oriented at an angle α to the edge a . Applying a certain potential difference to the upper and lower end faces of the plate causes the appearance of longitudinal and transverse components of the internal electric current. The paper demonstrates the possibility of transforming the magnitude of the electric current and a way to optimize this magnitude.

The transformation coefficient of such a device is determined by the anisotropy of the electrical conductivity of the plate and the coefficient of its shape $k = a/b$. The authors consider a few versions of anisotropic dielectric transformer design and offer their equivalent electric circuits. Another suggested transformer design is spiral in shape, compact and is characterized by high transformation coefficient value n . For example, at external radius $r_1 = 12,5$ mm, internal radius $r_2 = 2$ mm, height $b = 2$ mm and plate thickness $c = 2,0$ mm, its transformation coefficient $n = 10^3$.

The information is given on existing monocrystalline and artificial anisotropic materials that can be used for the proposed device. High-temperature superconducting materials characterized by a high value of residual resistance anisotropy hold special promise in this case.

Using the described transformation effect will significantly expand the possibilities of practical application of the considered electroohmic phenomenon. This will lead to the emergence of a new generation of devices for microwave technology, electronics and power engineering.

Keywords: anisotropy, electrically conductive medium, electric current, transformer, transformation coefficient.

REFERENCES

1. Tamm I. Ye. *Osnovy teorii elektrichestva* [Fundamentals of the theory of electricity]. Moscow, Leningrad, OGIZ, 1946, 660 p. (Rus)
2. Anatychuk L. I. *Termoelementy i termoelektricheskiye ustroystva* [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kiyev, Naukova dumka, 1979, 767 p. (Rus)
3. Ashcheulov A. A. et al. *Preobrazovatel' velichiny postoyannogo toka* [DC value converter]. A.s. 1512457 USSR, 1989. (Rus)
4. Nye J. F. *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*. Clarendon Press, 1957, 322 p.
5. Ashcheulov A. A. et al. *Electricity transformation process*. Pat. 151258 UA, 2020. (Ukr)
6. Marenkin S. F., Trukhan V. M. *Fosiridy, arsenidy tsinka i kadmiya* [Fosirides, arsenides of zinc and cadmium]. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus, 2010, 227 p. (Rus)
7. Gerashchenko O. A., Iordanishvili Ye. K., Gubkin T. S. et al. Heat flow sensors based on artificially anisotropic thermoelectric materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1978, vol. 35, no. 2, pp. 228–233. (Rus)
8. Tsuei C. C., Kirtley J. R. Pairing symmetry in cuprate superconductors. *Rev. Mod. Phys.*, 2000, vol. 72, iss. 4, pp. 969–1016. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.72.969>

Описание статьи для цитирования:

Ащеулов А. А., Деревянчук Н. Я., Лавренюк Д. А., Романюк И. С. Трансформация электрического тока анизотропной электропроводной средой. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 5–6, с. 28–32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.28>

Cite the article as:

Ashcheulov A. A., Derevianchuk M. Ya., Lavreniuk D. A., Romaniuk I. S. Electric current transformation by anisotropic electrically conductive medium. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 5–6, pp. 28–32. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.28>

В. В. ЦИБУЛЕНКО, к. т. н. С. В. ШУТОВ

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

E-mail: v-ts@isp.kiev.ua

ВИРОЩУВАННЯ ГЕТЕРОЕПІТАКСІЙНИХ ШАРІВ НА НЕІЗОПЕРІОДНИХ ПІДКЛАДКАХ МЕТОДОМ СКАНУЮЧОЇ РІДИННОФАЗОВОЇ ЕПІТАКСІЇ

Показано можливість вирощування методом скануючої рідиннофазової епітаксії суцільних по поверхні гетероепітаксійних шарів на підкладках, які значно відрізняються від шару за сталою ґратки і кристалохімічними властивостями. Це зроблено на прикладі гетероструктури «підкладка GaP — шар Ge», для якої різниця між значеннями сталих ґратки GaP та Ge складає 3,7%. Розчинником Ge слугував Ga. Гетероструктуру отримано методом скануючої рідиннофазової епітаксії в умовах надшвидкісного охолодження розчину-розплаву на початковому етапі росту. Показано, що якісніші гетероепітаксійні шари Ge на підкладці GaP можна отримати за використання низької швидкості росту на кінцевому етапі вирощування.

Ключові слова: скануюча рідиннофазова епітаксія, неізоперіодні гетероструктури, Ge, GaP, стала ґратки.

Інтерес до отримання гетероструктур, шари яких відрізняються за сталими ґратки та кристалохімічними властивостями, продиктовано їхнім використанням у приладах сучасної електроніки та оптоелектроніки [1—8]. Наприклад, у лазерах [4] та високоефективних фотоелектронних приймачах [5, 6] це розширює діапазон їхньої фоточутливості, а у штучних підкладках [7] дозволяє покращити властивості приладів [8].

На сьогодні основними методами виготовлення зазначених гетероструктур є наступні: металоорганічна епітаксія з парової фази (MOVPE, metal-organic vapor phase epitaxy) [9—11], металоорганічне хімічне осадження з пари (MOCVD, metal organic chemical vapor deposition) [12] та молекулярно-променева епітаксія (MBE, molecular beam epitaxy) [13—15]. Також відомі роботи з виготовлення гетероструктур методами рідиннофазової епітаксії [16—18].

Відомо, що методи вирощування з рідинної фази є найдешевшими, простими, а відтак, і доступними для широкого застосування. Саме тому становить інтерес отримання гетероструктур, шари яких відрізняються за сталими ґратки та кристалохімічними властивостями, з рідинної фази. Отримати такі гетероструктури можна двома способами: послідовно вирощувати градієнтні за складом шари, де стала ґратки змінюється від підкладки до шару [19—21], або вирощувати шари з розчину-розплаву, близького до граничного перенасичення [22], що досягається в умовах надшвидкісного охолодження і, відповідно, великої швидкості росту.

Серед відомих методів рідиннофазової епітаксії є метод скануючої рідиннофазової епітаксії (СРФЕ) [23], де використовується короткочасний контакт

охолодженої підкладки з розчином-розплавом. Це дозволяє створити умови для швидкого охолодження розчину-розплаву поблизу фронту кристалізації та, відповідно, миттєвої кристалізації епітаксійного шару без розчинення попередньо вирощених шарів або підкладки. Проте метод СРФЕ початково не був розроблений для вирощування в умовах, близьких до граничного перенасичення розчину-розплаву, а можливість вирощування цим методом гетероструктур, шари яких відрізняються за сталими ґратки та/або кристалохімічними властивостями, ще не досліджувалася.

Роботу присвячено дослідженню можливості вирощування методом скануючої рідиннофазової епітаксії суцільних по поверхні гетероепітаксійних шарів на підкладках, які значно відрізняються від шару за сталою ґратки і кристалохімічними властивостями, в умовах надшвидкісного охолодження розчину-розплаву.

Теоретичні передумови

Метод СРФЕ та експериментальну установку описано у [24, 25]. Для вирощування епітаксійного шару цим методом розчин-розплав необхідно привести в контакт з охолодженою підкладкою на короткий час. При цьому для забезпечення контакту, а після процесу вирощування — для очищення підкладки від розчину-розплаву можна використовувати силу Ампера.

У [24] показано, що основними параметрами методу СРФЕ, що дозволяють керувати температурно-часовим режимом росту, є початкові температури та розміри підкладки та розчину-розплаву, умови тепловідведення від тильної сторони підкладки та час самого процесу. Слід зауважити, що керувати температурним профілем тильної сторони підкладки мож-

на за допомогою встановленого на ній додаткового підігрівача [25].

Основна ідея роботи полягає у тому, що, керуючи основними параметрами методу СРФЕ, можна створити умови, близькі до граничного перенасичення розчину-розплаву. Тобто, розрахувавши початкову температуру при заданих розмірах підкладки та розчину-розплаву, а також встановивши режим тепловідведення від тильної сторони підкладки, можна створити умови надшвидкісного охолодження розчину-розплаву та, відповідно, великої швидкості росту.

В умовах надшвидкісного вирощування можливі два випадки: це нестійкість границі росту та навіть зрив росту через велике концентраційне переохолодження та зрив дифузійного механізму росту.

Відомо, що критерієм морфологічної стійкості шару, що росте, є критерій концентраційного переохолодження [26, с. 101]. У разі його великого значення епітаксійний ріст шару припиняється, а границя, яка відділяє область стійкості (відсутність комірок на фронті кристалізації) від області нестійкості (фронт розбитий на комірки), описується, як

$$\frac{dT}{dz} = \frac{w_2 m (N_s - N_l)}{D}, \quad (1)$$

де dT/dz — градієнт температури біля фронту кристалізації, необхідний для усунення концентраційного переохолодження;

w_2 — швидкість росту шару;

m — тангенс кута нахилу лінії ліквідуса на T - x -проекції діаграми стану (dT/dN_l);

D — коефіцієнт взаємодифузії Ge та Ga;

N_s, N_l — концентрація Ge у твердій фазі та у розчині-розплаві відповідно.

Оскільки температура на фронті кристалізації змінюється з часом, величини dT/dz , N_l та w у формулі (1) у випадку вирощування методом СРФЕ є

функціями часу. Отже, задаючи градієнт температури біля фронту кристалізації через початкові температури та розміри підкладки і розчину-розплаву, умови тепловідведення від тильної сторони підкладки та час контакту, можна знайти швидкість росту шару, за якої відбуватиметься концентраційне переохолодження. З іншого боку, необхідно, щоб швидкість кристалізації не перевищувала величину, за якої атоми, що кристалізуються, не встигають вбудовуватися до кристалічної ґратки. Тобто необхідно, щоб режим росту був дифузійним. З [27, с. 87] відомо, що при нормальному рості швидкість руху w_3 фронту кристалізації буде дорівнювати

$$w_3 = av \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \frac{N - N_0}{N_0} \exp \left(- \frac{E + \Delta H}{k_b T} \right), \quad (2)$$

де a — стала ґратки;

v — частота коливань атомів, $v = k_b T/h$;

k_b — стала Больцмана;

h — стала Планка;

λ — відстань між зламами на поверхні кристалу, $\lambda \approx 3a$;

N_0, N — рівноважна та нерівноважна концентрації на фронті кристалізації відповідно;

E — енергетичний бар'єр переходу атома із розчину до твердого тіла (для розрахунків E прийнято рівним ентальпії плавлення Ge).

Таким чином, для отримання гетероструктур в умовах надшвидкісного вирощування необхідно, щоб на початковому етапі швидкість росту гетероепітаксійного шару w_1 була більшою або дорівнювала значенню w_2 у формулі (1) при заданому переохолодженні на фронті кристалізації, але при цьому не досягала значення w_3 у формулі (2).

Для експериментальної перевірки запропонованої теорії було обрано гетероструктуру «підкладка GaP — шар Ge» через велике розузгодження їхніх параметрів ґраток — 3,7%. Розчинником Ge був обраний Ga через досить велику розчинність Ge в Ga [28, с. 593].

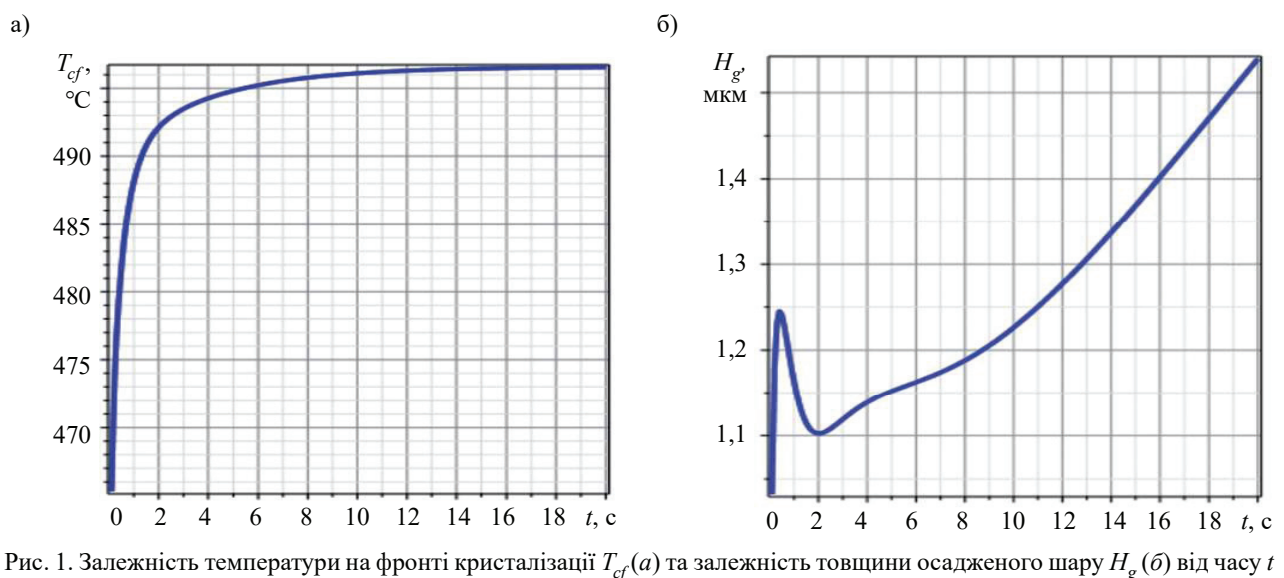


Рис. 1. Залежність температури на фронті кристалізації T_{cf} (а) та залежність товщини осажденного шару H_g (б) від часу t

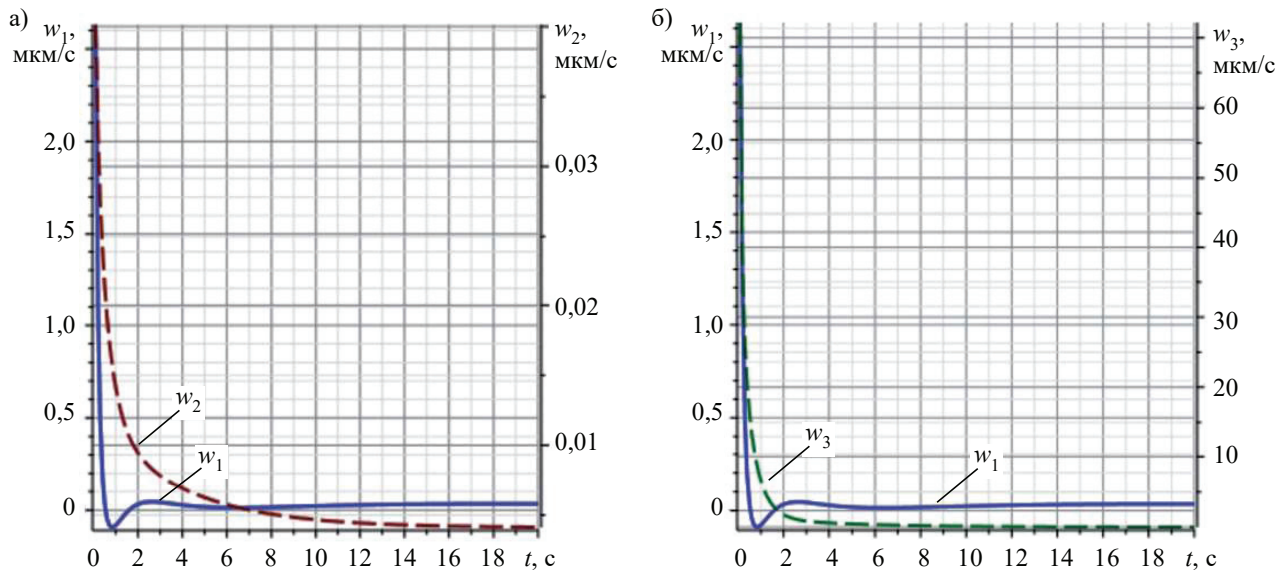


Рис. 2. Залежності швидкості росту шару від часу:

w_1 — швидкість росту шару; w_2 — максимальна швидкість росту, за якої не виникає концентраційного переохолодження; w_3 — швидкість руху фронту кристалізації при нормальному рості

Особливості моделювання технологічних етапів методу СРФЕ були розглянуті у [24]. Результати розрахунку тепло- та масоперенесення для обраної гетероструктури при використанні додаткового підігрівача підкладки наведено на **рис. 1**. Розраховані при заданих технологічних параметрах методу СРФЕ значення швидкості росту шару w_1 , максимальної швидкості росту, за якої не виникає концентраційного переохолодження, w_2 та швидкість руху фронту кристалізації при нормальному рості w_3 наведено на **рис. 2**.

З **рис. 2** видно, що при довготривалому контакті підкладки з розчином-розплавом ріст шару при використанні методу СРФЕ має відбуватися у три етапи. На першому, початковому, етапі росту (до 0,5 с) розрахункова швидкість росту w_1 є максимальною та значно перевищує критерій морфологічної стійкості w_2 (**рис. 2, а**), але не перевищує w_3 (**рис. 2, б**). На другому етапі (від 0,5 с до 2 с) відбувається розчинення частини вирощеного шару. Вочевидь, це пов'язано з перерозподілом в часі температури в системі «розчин-розплав — підкладка — нагрівач підкладки». Розрахункова швидкість росту w_1 зрівнюється з w_2 , а потім стає від'ємною (тобто відбувається розчинення). На третьому етапі (після 2 с) знову відбувається кристалізація шару, але спостерігається значне зменшення швидкості w_1 у порівнянні з першим етапом, хоча швидкість w_1 знову стає більшою за w_2 . На всіх етапах w_1 не перевищує w_3 , а значить, режим росту залишається дифузійним.

На наше припущення, якісніший гетероепітаксійний шар можна отримати, якщо в процесі вирощування використовувати третій етап, тобто наприкінці процесу підтримувати меншу швидкість росту.

Методика проведення експерименту

Для перевірки результатів розрахунків і наведеного вище припущення було проведено експеримент з вирощування гетероепітаксійного шару Ge на підкладці GaP з Ga-Ge-розчину-розплаву. Вирощування проводилося на експериментальній установці для скануючої рідиннофазової епітаксії із додатковим нагрівачем підкладки з її тильної сторони [25]. За допомогою зміни параметрів нагрівача підкладки можна керувати градієнтом температури біля фронту кристалізації та, відповідно, його переохолодженням. Для проведення експерименту був виготовлений нагрівач підкладки, що складався з двох елементів: нагрівального тіла розмірами $4 \times 4 \times 12$ мм і його власного нагрівача. Максимальна температура нагрівача підкладки складала 775°C у верхній його частині. Температурно-часовий режим кристалізації, показаний на **рис. 1, а**, розраховано саме за таких параметрів нагрівача підкладки.

Як підкладка було використано GaP орієнтацією (111). Зняття верхнього, механічно порушеного, шару проводилося хімічним травленням підкладки у розчині $\text{HNO}_3:\text{HCl} = 1:3$ впродовж 15 хв за температури біля 65°C .

Підготовку та процес вирощування описано у [23, 25]. Початкова температура розчину-розплаву складала 500°C , поверхні підкладки — 420°C . Час контакту розчину-розплаву із підкладкою для різних зразків складав 1 с або 20 с.

Для дослідження морфології вирощених гетероепітаксійних шарів були використані оптичні методи, а для визначення товщини шару — метод сферичного шліфа.

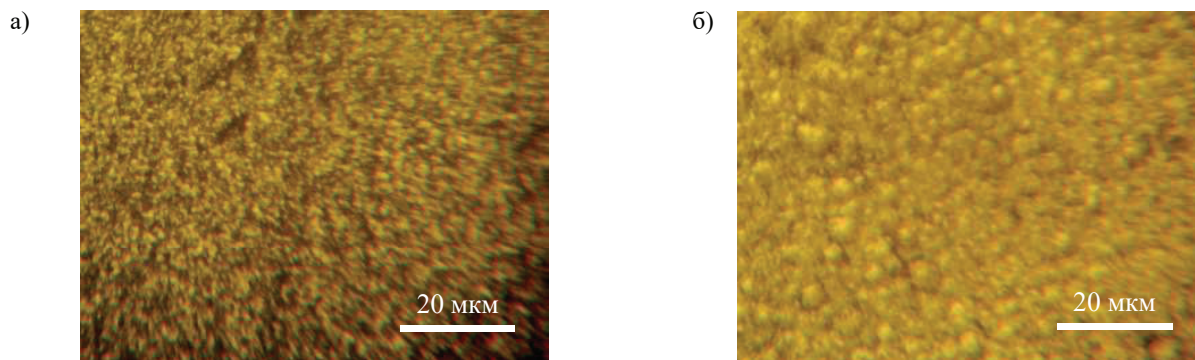


Рис. 3. Зображення поверхні зразків, вирощених за 1 с (а) та за 20 с (б)

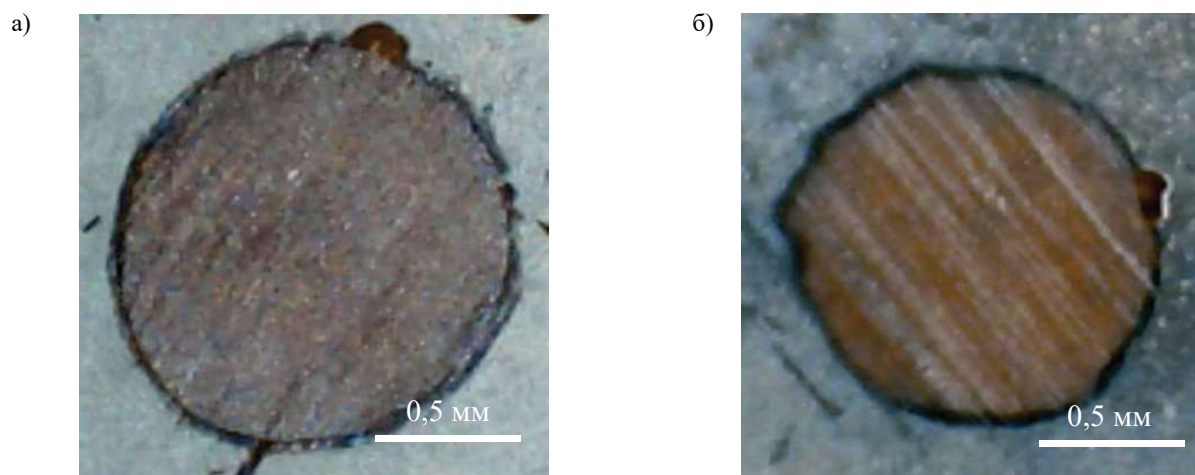


Рис. 4. Зображення поверхні сферичного шліфа зразків, вирощених за 1 с (а) та за 20 с (б)

Обговорення результатів експерименту

З рис. 3, а можна побачити, що поверхня зразка, вирощеного за 1 с, є дрібнокомірковою. Це підтверджує наведені вище розрахунки. Швидкість росту на початковому етапі (рис. 1, б) значно перевищувала критерій морфологічної стійкості, отже, відповідно, вирощений гетероепітаксійний шар розбився на дрібні комірочки. При цьому поверхня шару залишилася суцільною, а дендритного росту або зриву росту не відбулося.

У зразка, вирощеного за 20 с, на поверхні спостерігаються ямки розчинення (рис. 3, б). Вочевидь, вони виникли на другому етапі вирощування, коли отриманий на початковому етапі комірковий шар почав розчинятися. Проте в цьому випадку комірочки на поверхні не спостерігаються, що можна пояснити значно меншою швидкістю наступного росту (третього етапу).

Ці результати свідчать про те, що гетероепітаксійний шар, вирощений за 20 с із зменшеною швидкістю росту на кінцевому етапі, є більш якісним, ніж вирощений за 1 с.

Оскільки очікувана товщина гетероепітаксійних шарів Ge на підкладці GaP — мікронних розмірів, для її знаходження використано метод сферичного шліфа. Діаметр кульки становив 51 мм. Визначені цим мето-

дом значення товщини шарів для зразків складають 1,2 та 1,5 мкм, відповідно, для часу вирощування 1 та 20 с (рис. 4). Як бачимо, ці значення збігаються з теоретично розрахованими, що представлені на рис. 1, б.

Висновки

Таким чином, було показано можливість отримання гетероепітаксійних шарів, що значно відрізняються сталими ґратки та кристалохімічними властивостями, методом скануючої рідиннофазової епітаксії в умовах надшвидкісного вирощування. Експериментально отримано суцільні по поверхні гетероепітаксійні шари Ge на підкладці GaP в умовах надшвидкісного вирощування методом скануючої рідиннофазової епітаксії при тривалості кристалізації 1 та 20 с. Показано, що якісніші гетероепітаксійні шари можна отримати при використанні меншої швидкості росту на кінцевому етапі вирощування. Дана технологія може бути використана для виготовлення гетероструктур, що застосовуються для створення сучасних електронних та оптоелектронних приладів, наприклад структур на основі сполук A_3B_5 та їхніх твердих розчинів, які неможливо отримати іншими класичними методами рідиннофазової епітаксії через суттєві відмінності сталих ґраток та/або кристалохімічних властивостей.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Li Q., May Lau K. Epitaxial growth of highly mismatched III-V materials on (001) silicon for electronics and optoelectronics. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2017, vol. 63, p. 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2017.10.001>
2. Zhao C., Xu B., Wang Z., Wang Z. Boron-doped III–V semiconductors for Si-based optoelectronic devices. *Journal of Semiconductors*, 2020, vol. 41, iss. 1, 011301. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/41/1/011301>
3. Mishra P., Nguyen A., Chen P.W., Tseng C.K., Lee M.C. Implementation of lateral Ge-on-Si heterojunction photodetectors via rapid melt growth and self-aligned microbonding for Si photonics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 58, SJJC02. <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab24b3>
4. Viheriala J., Aho A., Isoaho R., Aho A., Tukiainen A., Guina M. Quantum-well laser diodes operating at 1.28 μm monolithically integrated on Ge substrate. *Proceedings 10537. Silicon Photonics XIII. 105370U* (2018). <https://doi.org/10.1117/12.2292738>
5. Lan D., Green M. Up-conversion of sunlight by GaInP/GaAs/Ge cell stacks: Limiting efficiency, practical limitation and comparison with tandem cells. *Energy Procedia*, 2017, vol. 130, p. 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.396>
6. Tournet J., Parola S., Vauthelin A. et al. GaSb-based solar cells for multi-junction integration on Si substrates. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, vol. 191, p. 444–450. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.11.035>
7. Baidus N.V., Aleshkin V.Y., Dubinov A.A. et al. On the Application of Strain-Compensating GaAsP Layers for the Growth of InGaAs/GaAs Quantum-Well Laser Heterostructures Emitting at Wavelengths above 1100 nm on Artificial Ge/Si Substrates. *Semiconductors*, 2018, vol. 52, p. 1547–1550. <https://doi.org/10.1134/S1063782618120060>
8. Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П., Соколов Л.В., Чикичев С.И. Искусственные подложки GeSi для гетероэпитаксии — достижения и проблемы. Обзор. *Физика и техника полупроводников*, 2003, т. 37, № 5, с. 513–538.
9. Roychowdhury R., Dixit V.K., Vashisht G. et al. Surface and interface properties of ZrO_2/GaAs , SiO_2/GaAs and GaP/GaAs heterostructures investigated by surface photovoltage spectroscopy. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 476, p. 615–622. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.103>
10. Oshima R., France R., Geisz J. et al. Growth of lattice-matched GaInAsP grown on vicinal GaAs(001) substrates within the miscibility gap for solar cells. *J. Cryst. Growth*, 2017, vol. 458, p. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.10.025>
11. Barrutia L., Garcia I., Barrigán E. et al. Impact of the III–V/Ge nucleation routine on the performance of high efficiency multijunction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, vol. 207, 110355. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110355>
12. Li X., Zhao Y., Wu Q. et al. Exploring the optimum growth conditions for InAs/GaSb and GaAs/GaSb superlattices on InAs substrates by metalorganic chemical vapor deposition. *J. Cryst. Growth*, 2018, vol. 502, p. 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.09.003>
13. Ghosh S., Rodrigues L., Moura L., Ferreira S. Epitaxial growth and characterization of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ films on Si (111) substrates. *J. Cryst. Growth*, 2019, vol. 522, p. 25–29. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.06.009>
14. Desplanque L., Bucamp A., Troadec D. et al. Selective area molecular beam epitaxy of InSb nanostructures on mismatched substrates. *J. Cryst. Growth*, 2019, vol. 512, p. 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.02.012>
15. Nakasu T., Sun W., Kobayashi M., Asahi T. Effect of Zn and Te beam intensity upon the film quality of ZnTe layers on severely lattice mismatched sapphire substrates by molecular beam epitaxy. *J. Cryst. Growth*, 2017, vol. 468, p. 635–637. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.11.035>
16. Rao Y., Zhang H., Yang Q. et al. Liquid phase epitaxy magnetic garnet films and their applications. *Chin. Phys. B*, 2018, vol. 27, iss. 8, 086701. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/8/086701>
17. Tsybrii Z., Bezsmolnyy Yu., Svezhentsova K. et al. HgCdTe/CdZnTe LPE epitaxial layers: From material growth to applications in devices. *J. Cryst. Growth*, 2020, vol. 529, p. 125295. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125295>
18. Donchev V., Milanova M., Georgiev S. et al. Dilute nitride InGaAsN and GaAsSbN layers grown by liquid-phase epitaxy for photovoltaic applications. *J. Phys.: Conf. Series*, 2020, vol. 1492, p. 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1492/1/012049>
19. Ci J.-W., Lian C.-Y., Uen W.-Y. et al. Formation mechanism of high Ge content SiGe epilayer on Si by liquid phase epitaxy using Ge–Sn solution. *Thin Solid Films*, 2020, vol. 704, p. 137981. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.137981>
20. Long J., Xiao M., Huang X. et al. High efficiency thin film GaInP/GaAs/InGaAs inverted metamorphic (IMM) solar cells based on electroplating process. *J. Cryst. Growth*, 2019, vol. 513, p. 38–42. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.02.057>
21. Reisinger M., Ostermaier C., Tomberger M. et al. Matching in-situ and ex-situ recorded stress gradients in an $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ heterostructure: Complementary wafer curvature analyses in time and space. *Scripta Materialia*, 2018, vol. 147, p. 50–54. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.12.016>
22. Абрамов А.В., Дерягин Н.Г., Третьяков Д.Н. Применение сверхбыстрого (102—103°C/c) охлаждения раствора-расплава в жидкофазной эпитаксии полупроводников. *Физика и техника полупроводников*, 1999, т. 33, № 9, с. 1130–1133.
23. Tsybulenko V.V., Shutov S.V., Yerochin S.Yu. LPE application technique for obtaining of thin film semiconductor materials. *Proc. 1st Intern. Electronic Conf. on Crystals (IECC 2018)*. 2018. https://doi.org/10.3390/IECC_2018-05250
24. Tsybulenko V., Shutov S., S. Yerochin Determination of crystallization conditions of Ge/GaAs heterostructures in scanning LPE method. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2020, vol. 23, no 3, p. 294–301. <https://doi.org/10.15407/spqeo23.03.294>
25. Цибуленко В.В., Шутов С.В., Боскін О.О. Особливості використання методу скануючої рідиннофазної епітаксії для вирощування товстих епітаксійних шарів. *Наукові вісті КНУ*, 2020, №3, с. 58–64. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.3.197877>
26. Соколов И.А. *Расчеты процессов полупроводниковой технологии*. Москва, Металлургия, 1994.
27. Chernov A.A. *Modern Crystallography III: Crystal Growth*. Springer Science & Business Media, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81838-7>
28. Лякишев Н.П. *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Том 2. Москва, Машиностроение, 2000.

Дата надходження рукопису
до редакції 03.11 2020 р.

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.33
УДК 621.3/669/67.02/67.05

В. В. ЦЫБУЛЕНКО, С. В. ШУТОВ

Украина, г. Херсон, ИФП им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины
E-mail: rv-ts@isp.kiev.ua

ВЫРАЩИВАНИЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ НА НЕИЗОПЕРИОДНЫХ ПОДЛОЖКАХ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Показана возможность выращивания методом сканирующей жидкофазной эпитаксии сплошных по поверхности гетероэпитаксиальных слоев на подложках, которые существенно отличаются от слоев по периоду решетки и кристаллохимическим свойствам. Управление основными параметрами метода позволило создать условия, близкие к граничному пересыщению раствора-расплава, то есть — сверхскоростного охлаждения раствора-расплава и, соответственно, большой скорости роста. Проведено выращивание гетероструктуры «подложка GaP — слой Ge», у которой несоответствие по периодам решетки составляет 3,7%. В качестве растворителя Ge был использован Ga. Гетероструктура получена методом сканирующей жидкофазной эпитаксии в условиях сверхскоростного охлаждения раствора-расплава на начальном этапе роста. Управление переохлаждением на фронте кристаллизации выполнялось при помощи дополнительного нагревателя подложки с ее тыльной стороны. Время выращивания для разных образцов составляло 1 или 20 с. Методом шар-шлифа определена толщина образцов, она составила 1,2 мкм при времени выращивания 1 с и 1,5 мкм при 20 с. Исследования показали, что более качественные эпитаксиальные слои Ge на подложке GaP можно получить при использовании меньшей скорости роста на конечном этапе выращивания. Данная технология может быть использована при изготовлении гетероструктур, используемых для создания современных электронных и оптоэлектронных приборов, например структур на основе соединений A_3B_5 и их твердых растворов, которые невозможно получить другими классическими методами жидкофазной эпитаксии из-за существенных различий постоянных решеток и/или кристаллохимических свойств.

Ключевые слова: сканирующая жидкофазная эпитаксия, неизопериодные гетероструктуры, Ge, GaP, постоянная решетки.

DOI: 10.15222/TKEA2020.5-6.33
UDC 621.3/669/67.02/67.05

V. V. TSYBULENKO, S. V. SHUTOV

Ukraine, Kherson, V. Lashkaryov Institute
of Semiconductor Physics, NAS Ukrain
E-mail: v-ts@isp.kiev.ua

GROWING OF HETEROEPITAXIAL LAYERS ON LATTICE MISMATCHED SUBSTRATES BY THE METHOD OF SCANNING LIQUID PHASE EPITAXY

Heterostructures with lattice mismatched and compositionally different layers are widely used in modern electronic and optoelectronic device engineering. Generally such structures are manufactured by the methods of metal-organic vapor phase epitaxy, metal-organic chemical vapor deposition and molecular-beam epitaxy. However, the methods of deposition from a liquid phase are the most inexpensive and simple yet. Thus obtaining the above mentioned heterostructures from a liquid phase is still promising. In this work we demonstrated the possibility of using the method of scanning liquid phase epitaxy to grow continuous heteroepitaxial layers over the substrate surface highly mismatched by lattice constant and having different crystal-chemical properties. By controlling basic parameters of the method we created the conditions close to the solution-melt saturation limit. In other words, we created the conditions of ultra-fast solution-melt cooling and, respectively, high growth rate. We obtained the heterostructures of Ge layers grown on GaP substrates where the lattice mismatch made 3.7%. Gallium was used as the solvent for Germanium. The heterostructure was grown by the method of scanning liquid phase epitaxy in the conditions of ultra-fast initial cooling of the solution-melt. Overcooling at the crystallization front was controlled by an extra heater of the substrate back side. The growing time was 1 and 20 seconds for the two test samples. The layers thickness was determined by the spherical slice technique to be 1.2 and 1.5 μm for these two growing time values, accordingly. We showed that it was possible to obtain more perfect Ge layers on GaP substrate by lowering the growth rate in the final growth stage.

This method can be used to grow heterostructures used in creating such modern electronic and optoelectronic devices as structures based on A_3B_5 compounds and their solid solutions, which cannot be obtained by other classical methods of liquid phase epitaxy due to significant differences in lattice constants and / or crystal-chemical properties.

Keywords: scanning liquid phase epitaxy, high lattice mismatch heterostructures, Ge, GaP, lattice constant.

REFERENCES

1. Li Q., May Lau K. Epitaxial growth of highly mismatched III-V materials on (001) silicon for electronics and optoelectronics. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2017, vol. 63, pp. 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2017.10.001>
2. Zhao C., Xu B., Wang Z., Wang Z. Boron-doped III-V semiconductors for Si-based optoelectronic devices. *Journal of Semiconductors*, 2020, vol. 41, iss. 1, 011301. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/41/1/011301>
3. Mishra P., Nguyen A., Chen P.W., Tseng C.K., Lee M.C. Implementation of lateral Ge-on-Si heterojunction photodetectors

via rapid melt growth and self-aligned microbonding for Si photonics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 58, SJJC02. <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab24b3>

4. Viheriala J., Aho A., Isoaho R., Aho A., Tukiainen A., Guina M. Quantum-well laser diodes operating at 1.28 μm monolithically integrated on Ge substrate. *Proceedings 10537. Silicon Photonics XIII*. 105370U (2018). <https://doi.org/10.1117/12.2292738>

5. Lan D., Green M. Up-conversion of sunlight by GaInP/GaAs/Ge cell stacks: Limiting efficiency, practical limitation and comparison with tandem cells. *Energy Procedia*, 2017, vol. 130, pp. 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.396>

6. Tournet J., Parola S., Vauthelin A. et al. GaSb-based solar cells for multi-junction integration on Si substrates. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, vol. 191, pp. 444–450. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.11.035>

7. Baidus N.V., Aleshkin V.Y., Dubinov A.A. et al. On the Application of Strain-Compensating GaAsP Layers for the Growth of InGaAs/GaAs Quantum-Well Laser Heterostructures Emitting at Wavelengths above 1100 nm on Artificial Ge/Si Substrates. *Semiconductors*, 2018, vol. 52, pp. 1547–1550. <https://doi.org/10.1134/S1063782618120060>

8. Bolkhovityanov Yu.B., Pchelyakov O.P., Socolov L.V., Chikichev S.I. Artificial GeSi substrates for heteroepitaxy: Achievement and problems. *Semiconductors*, 2003, vol. 37, no. 5, pp. 493–518. <https://doi.org/10.1134/1.1575352>

9. Roychowdhury R., Dixit V.K., Vashisht G. et al. Surface and interface properties of ZrO_2/GaAs , SiO_2/GaAs and GaP/GaAs heterostructures investigated by surface photovoltage spectroscopy. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 476, pp. 615–622. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.103>

10. Oshima R., France R., Geisz J. et al. Growth of lattice-matched GaInAsP grown on vicinal GaAs(001) substrates within the miscibility gap for solar cells. *J. Cryst. Growth*, 2017, vol. 458, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.10.025>

11. Barrutia L., Garcia I., Barrigin E. et al. Impact of the III–V/Ge nucleation routine on the performance of high efficiency multijunction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, vol. 207, 110355. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110355>

12. Li X., Zhao Y., Wu Q. et al. Exploring the optimum growth conditions for InAs/GaSb and GaAs/GaSb superlattices on InAs substrates by metalorganic chemical vapor deposition. *J. Cryst. Growth*, 2018, vol. 502, pp. 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.09.003>

13. Ghosh S., Rodrigues L., Moura L., Ferreira S. Epitaxial growth and characterization of $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ films on Si (111) substrates. *J. Cryst. Growth*, 2019, vol. 522, pp. 25–29. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.06.009>

14. Desplanque L., Bucamp A., Troadec D. et al. Selective area molecular beam epitaxy of InSb nanostructures on mismatched substrates. *J. Cryst. Growth*, 2019, vol. 512, pp. 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.02.012>

15. Nakasu T., Sun W., Kobayashi M., Asahi T. Effect of Zn and Te beam intensity upon the film quality of ZnTe layers on severely lattice mismatched sapphire substrates by molecular beam epitaxy.

J. Cryst. Growth, 2017, vol. 468, pp. 635–637. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.11.035>

16. Rao Y., Zhang H., Yang Q. et al. Liquid phase epitaxy magnetic garnet films and their applications. *Chin. Phys. B*, 2018, vol. 27, iss. 8, 086701. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/8/086701>

17. Tsybrii Z., Bezsmolnyy Yu., Svezhentsova K. et al. HgCdTe/CdZnTe LPE epitaxial layers: From material growth to applications in devices. *J. Cryst. Growth*, 2020, vol. 529, p. 125295. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125295>

18. Donchev V., Milanova M., Georgiev S. et al. Dilute nitride InGaAsN and GaAsSbN layers grown by liquid-phase epitaxy for photovoltaic applications. *J. Phys.: Conf. Series*, 2020, vol. 1492, p. 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1492/1/012049>

19. Ci J.-W., Lian C.-Y., Uen W.-Y. et al. Formation mechanism of high Ge content SiGe epilayer on Si by liquid phase epitaxy using Ge–Sn solution. *Thin Solid Films*, 2020, vol. 704, p. 137981. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.137981>

20. Long J., Xiao M., Huang X. et al. High efficiency thin film GaInP/GaAs/InGaAs inverted metamorphic (IMM) solar cells based on electroplating process. *J. Cryst. Growth*, 2019, vol. 513, pp. 38–42. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.02.057>

21. Reisinger M., Ostermaier C., Tomberger M. et al. Matching in-situ and ex-situ recorded stress gradients in an $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ heterostructure: Complementary wafer curvature analyses in time and space. *Scripta Materialia*, 2018, vol. 147, pp. 50–54. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.12.016>

22. Abramov A.V., Deryagin N.G., Tret'yakov D.N. Application of superfast (102–103°C/s) cooling of a solution-melt in the liquid-phase epitaxy of semiconductors. *Semiconductors*, 1999, vol. 33, no. 9, pp. 1130–1133.

23. Tsybulenko V.V., Shutov S.V., Yerochin S.Yu. LPE application technique for obtaining of thin film semiconductor materials. *Proc. 1st Intern. Electronic Conf. on Crystals (IECC 2018)*. 2018. https://doi.org/10.3390/IECC_2018-05250

24. Tsybulenko V., Shutov S., S. Yerochin Determination of crystallization conditions of Ge/GaAs heterostructures in scanning LPE method. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2020, vol. 23, no 3, pp. 294–301. <https://doi.org/10.15407/spqeo23.03.294>

25. Tsybulenko V., Shutov S., Boskin O. The features of scanning liquid phase epitaxy technique as applied to thick epitaxial layers growth. *KPI Science News*, 2020, no 3, pp. 58–64. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.3.197877> (Ukr)]

26. Sokolov I.A. *Raschety protsessov poluprovodnikovoy tekhnologii* [Calculations of Semiconductor Technology Processes]. Moscow, Metallurgiya, 1994. (Rus).

27. Chernov A.A. *Modern Crystallography III: Crystal Growth*. Springer Science & Business Media, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-81838-7>.

28. Lyakyshev N.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynnykh metallicheskih sistem. T. 2*. [State Diagrams of Double Metal Systems. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie, 2000. (Rus).

Опис статті для цитування:

Цибуленко В. В., Шутов С. В. Вирощування гетероепітаксійних шарів на неізоперіодних підкладках методом скануючої рідиннофазової епітаксії. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2020, № 5–6, с. 33–39. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.33>

Cite the article as:

Tsybulenko V. V., Shutov S. V. Growing of heteroepitaxial layers on lattice mismatched substrates by the method of scanning liquid phase epitaxy. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2020, no. 5–6, pp. 33–39. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.33>

К. т. н. А. Г. ДУБКО^{1, 2}, Р. С. ОСІПОВ¹, к. т. н. Ю. В. БОНДАРЕНКО¹, к. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО¹

Україна, м. Київ, ¹КПІ ім. Ігоря Сікорського; ²ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України

E-mail: andreyies17@gmail.com, romanosipov1997@gmail.com, bondarenkoaf@gmail.com

ЕЛЕКТРОННІ ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН

Описано розроблений експериментальний апаратно-програмний комплекс для дослідження деформації біологічних тканин і біосумісних матеріалів при стисненні та представлено результати її практичного застосування. Проаналізовано отримані залежності механічного напруження зразків біологічних тканин від їхньої деформації під дією тиску. Наведено приклади використання практичних даних, вимірюваних розробленою установкою, та визначено подальші кроки для розвитку досліджень в даному напрямку.

Ключові слова: апаратно-програмний комплекс, біологічна тканина, біосумісний матеріал, вимірювання, механічні властивості.

Сучасна медицина розвивається надзвичайно швидкими темпами завдяки використанню передових досягнень різних технічних галузей, як то електроніка, механіка, мехатроніка, хімія, матеріалознавство, робототехніка, програмування та ін. Наприклад, підготовка хірургічних операцій на внутрішніх органах здійснюється також і за допомогою тривимірного комп'ютерного моделювання. Під час медичного навчання, зокрема, в області ендоскопічної, ендovasкулярної та відкритої хірургії активно застосовуються комп'ютерні симуляційні тренажери [1, 2], а операції з реконструктивної хірургії проводяться за допомогою високоякісних ендопротезів та штучних біосумісних тканин і матеріалів [3, 4]. Останнім часом також успішно поширюється запровадження технології електрозварювання для з'єднання живих тканин [5—7], однак досягти максимальної ефективності застосування сучасних приладів та технологій для цього можна лише при досконалому знанні характеристик біологічних тканин та біосумісних матеріалів. Задля вибору оптимальних режимів використання спеціального обладнання виконуються експерименти з дослідження механічних деформацій, які виникають в тканинах під дією хірургічного інструменту [8], проводяться тестування впливу на тканини мехатронних маніпуляторів та зварювальних електродів для відкритої хірургії. Застосування невідповідних режимів роботи медичного обладнання може заподіяти непоправну шкоду здоров'ю пацієнтів. Так, приміром, неправильний розрахунок необхідного тиску електродів при з'єднанні зварюванням живих тканин може завадити формуванню надійних електрохірургічних швів, а недостатнє вивчення характеристик міцності та деформаційних властивостей штучних тканин може призвести до помилкових висновків щодо їхньої придатності як імплантатів.

Очевидно, що для успішного вирішення завдань загальної та відновлювальної хірургії, трансплантології, мануальної терапії, віртуального моделювання хірургічних операцій, роботизації хірургії тощо [5—14] вкрай актуальними є дослідження механічних характеристик м'яких біологічних тканин і біосумісних матеріалів з метою коректного опису їхньої поведінки під дією медичного обладнання та інструментів.

Представлену роботу присвячено аналізу відомих рішень та підходів, що використовуються для дослідження механічних властивостей біологічних і біосумісних тканин, та направлено на розробку спеціального обладнання для вимірювання механічних деформацій цих тканин, яке матиме високі метрологічні характеристики, низьку ціну та достатній функціонал.

Біологічна тканина як об'єкт дослідження

Біологічна тканина являє собою композиційний матеріал, який утворюється об'ємним поєднанням хімічно та механічно різнорідних компонентів. При цьому біологічні тканини вважаються гіперпружними (еластомерами) [15, 16], а їхня поведінка під дією навантаження сильно відрізняється від поведінки матеріалів, використовуваних у техніці. Біологічні тканини можуть витримувати істотні деформації, наприклад шкіра людини внаслідок розтягування може досягати 200% первинної довжини.

На **рис. 1** в загальному вигляді показано залежність механічного напруження σ від відносної деформації шкіри ϵ та механічну модель пружної деформації шкіри. Як видно з графіку, наведена залежність є нелінійною: спочатку суттєві деформації викликають доволі незначне напруження, а потім відносно невелике збільшення деформації призводить до стрімкого наростання напруження [17]. У тако-

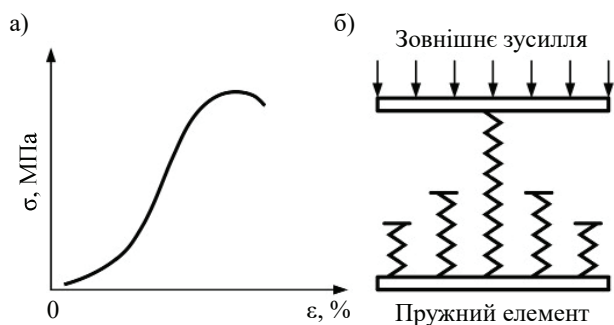


Рис. 1. Залежність напруження від відносної деформації шкіри (а) та модель пружної деформації шкіри (б)

му випадку зв'язок між напруженням та деформацією не може бути описаним з використанням закону Гука, він задається за допомогою потенціалу енергії деформації [18].

Пружні властивості та міцність біологічних тканин визначаються в основному волокнами білків еластину і колагену, механічні характеристики яких суттєво відрізняються.

Еластинові волокна входять до складу стінок судин, м'язів, покривних оболонок тощо і являють собою гумоподібний матеріал, який є гнучким і здатним розтягуватися. Еластин має порівняно високу розтяжність, тобто низький модуль пружності при розтягуванні уздовж волокна: $(0,4—1,0) \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ [19].

Колагенові волокна є важливою конструктивною частиною з'єднувальної тканини та входять до складу кісток, стінок судин, м'язових оболонок тощо. Колаген має на порядок вищий, ніж еластин, модуль пружності $(0,5—1,0) \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$, тобто характеризується нижчою здатністю до розтягування [19, 20]. Межа міцності колагену становить 18—25 МПа. Маючи високий модуль пружності та міцність, ці волокна запобігають розриву сухожилів, стінок кровоносних судин та інших тканин при великих механічних навантаженнях, а в легенях забезпечують тканинну стабілізацію альвеол [19, 21].

Завдяки різним поєднанням еластинових та колагенових волокон біологічні тканини набувають необхідних механічних властивостей. Так, наприклад, для стінок кровоносних судин характерною є в'язкопружність, яка відіграє велику роль у кровоотоку. Стінки мають забезпечувати збереження оптимального діаметра судини, який у разі зміни тиску не повинен змінюватися більш ніж на 12%. Слід відзначити, що останніми роками успішно застосовують протезування кровоносних судин за допомогою спеціальних штучних матеріалів, що відтворюють їхні основні властивості включно з підтриманням оптимального діаметра просвіту судини, який є функцією модуля пружності та артеріально-го тиску [22].

Все це свідчить про важливість проведення досліджень з точного вимірювання основних механічних параметрів тканин та пред'являє особливо високі вимоги до характеристик та функціональних можливостей відповідних програмно-технічних засобів.

Засоби для дослідження механічних характеристик біотканин

Відомі системи промислового виробництва, які здійснюють всі види досліджень механічних характеристик [23]. Серед них можна виділити як універсальні системи, призначені для досліджень різних матеріалів у широкому діапазоні параметрів, так і спеціалізовані системи для випробування *in-vitro* біологічних тканин, зокрема на стиснення, вигин та розтягнення (рис. 2, а). Такі системи зазвичай мають відмінні технічні характеристики, проте їхня висока вартість спонукає дослідницькі та навчальні лабораторії до пошуку дешевших альтернатив, якими можуть бути вузькоспеціалізовані одиничні установки власного виробництва, що здатні здійснювати обмежений перелік необхідних досліджень у достатньому діапазоні параметрів (рис. 2, б) [24].

Розглянемо спеціалізовані системи для проведення випробувань біологічних тканин на стиснення, які можуть бути задіяні як частина дослідницького обладнання в лабораторії електрозварювання живих тканин.

На рис. 3 показано спрощену структуру, яка є загальною для будь-якої системи дослідження механічної деформації тканин під дією тиску. Структура містить електрод-індентор з актуатором, давач тиску, систему керування та збору даних з підключенням до персонального комп'ютера та блок живлення.

Електрод-індентор діє безпосередньо на досліджуваний зразок тканини, що розміщується на жорсткій платформі. Він приводиться в дію актуатором електромеханічного, пневматичного, гідравлічного або іншого типу, який здійснює плавне переміщення електрода-індентора вздовж вертикальної осі, при цьому величина кроку переміщення впливає на точність вимірювань: чим меншим є крок переміщення, тим вищою може бути точність. Система керування та збору даних надсилає актуатору сигнали керування, які задають закон руху електрода-індентора в процесі дослідження, а також приймає електричні сигнали з давача тиску, пропорційні тиску, здійснюваному електродом-індентором на дослідний зразок тканини. При цьому система керування може або виводити дані на персональний комп'ютер, або мати власні засоби обробки та візуалізації результатів вимірювання.

Для побудови системи керування та збору даних можуть бути використані стандартні рішення у вигляді універсальних плат введення-виведення даних або пристрої з унікальною архітектурою. Переваги застосування готових універсальних рішень є цілком

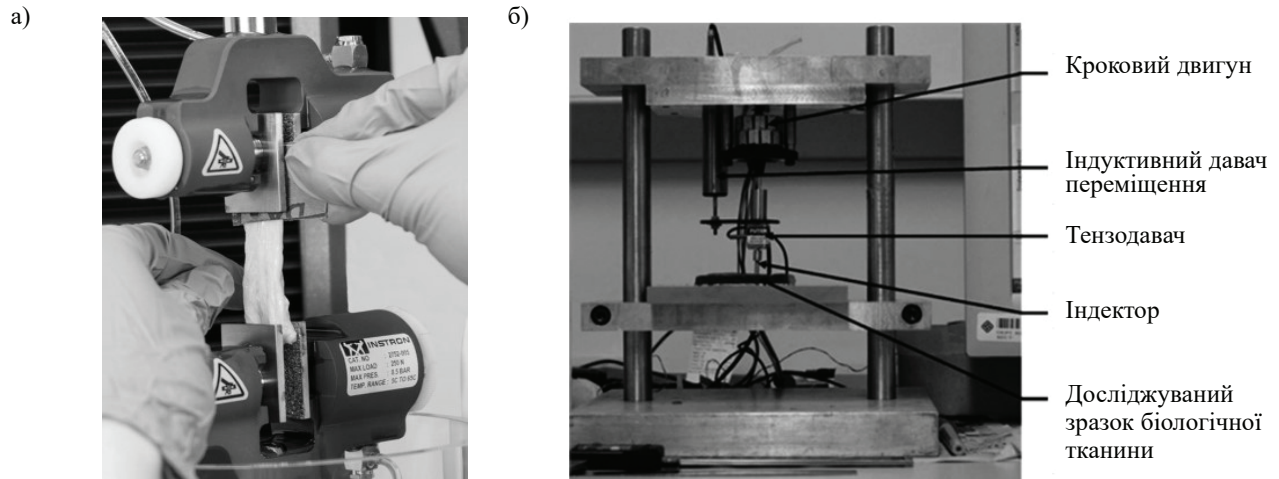


Рис. 2. Приклади систем для дослідження механічних характеристик біотканин:
а — промислового виробництва [23]; б — лабораторного виконання [24]

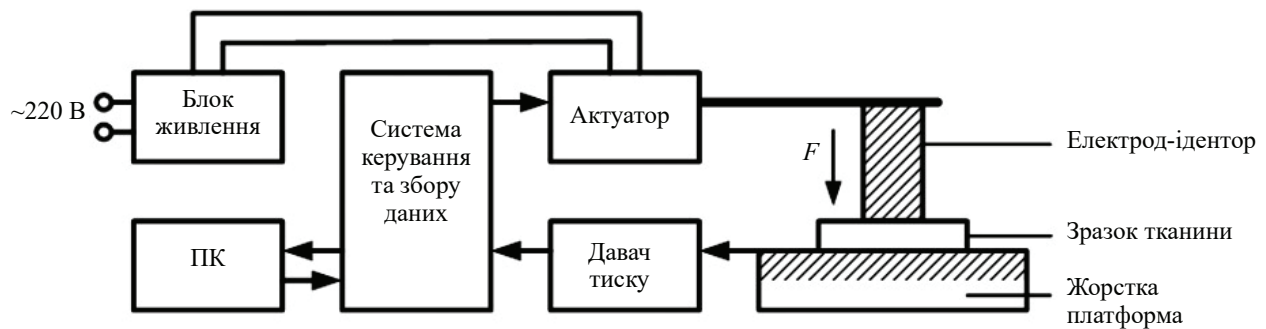


Рис. 3. Узагальнена схема системи дослідження деформацій біологічних тканин і біосумісних матеріалів при стисненні

зрозумілими: швидкість та простота розробки, можливість використання готового програмного забезпечення, сервісне обслуговування тощо. Серед таких рішень варто виділити платформи, що об'єднують потужні апаратні модулі збору даних, універсальні драйвери та прикладне програмне забезпечення, яке реалізує графічні мови програмування [25]. Такі платформи дозволяють ефективно вирішувати багато технічних і дослідницьких завдань, проте зазвичай мають дуже високу вартість, а їхня універсальність часто означає наявність надлишкового апаратного функціонала та недостатню гнучкість систем графічного програмування. Альтернативою тут може бути використання недорогих апаратно-програмних комплексів, на кшталт Arduino, які при досить помірній вартості надають достатні можливості для вирішення технічних завдань, пов'язаних з вимірюваннями, передачею даних до комп'ютера та управлінням виконавчими пристроями [26].

Arduino — це проста у використанні відкрита електронна платформа, що включає відкрите програмне забезпечення, призначена для швидкого створення інтерактивних електронних пристроїв. Платформа будується на базі мікроконтролерів Atmel і використовується для отримання сигналів

від аналогових і цифрових давачів, управління різними виконавчими пристроями та обміну інформацією з комп'ютером за допомогою різних інтерфейсів. Завдяки своїй простоті та невисокій вартості платформа знаходить широке застосування в навчальних лабораторіях. Зокрема, платформа Arduino була обрана нами при побудові експериментальної установки для отримання емпіричних даних про механічні властивості біологічних тканин та біосумісних матеріалів.

Опис експериментальної установки

За прототип експериментальної установки для дослідження деформацій біологічних тканин і біосумісних матеріалів при стисненні було обрано систему, наведену на рис. 2, б. Структура установки відповідає рис. 3, а у загальному вигляді вона представлена на рис. 4. Функцію давача тиску тут виконує тензометричний давач, що перетворює величину деформації в електричний аналоговий сигнал. Основою конструкції давача є резистивний міст Уїтстона, елементи якого змінюють свій опір при деформації. Давач використано спільно з високоточним двоканальним модулем, побудованим на спеціалізованій мікросхемі HX711, який здійснює перетворен-

ня аналогових даних з давача до цифрового вигляду. Модуль має 24-розрядний аналого-цифровий перетворювач, що забезпечує високу точність вимірювання. З метою спрощення програмування мікросхеми NH711 використано відповідну бібліотеку Arduino, що містить готові функції для роботи з нею [27].

Роль актуатора виконує сервопривід MG996R, який забезпечує мінімальний крок переміщення 0,052 мм, що відповідає одному градусу повороту. Використання в розроблюваній установці сервоприводу замість крокового двигуна, як у [24], дозволяє підвищити точність позиціонування електроду пристрою при переміщенні.

Для здійснення безпосереднього тиску на досліджуваній зразок використано електрод-індентор круглого перерізу діаметром 5 мм зі сталі, що має підвищену ударостійкість і пружність.

Попереднє визначення необхідних параметрів давача тиску та сервоприводу здійснювалось за допомогою моделювання в пакеті COMSOL 5.2 процесу стиснення біотканини (фрагменту м'язової тканини) між двома жорсткими сталевими плитами (рис. 5). Так, в результаті моделювання були визначені крок переміщення сервоприводу, момент сили сервоприводу,

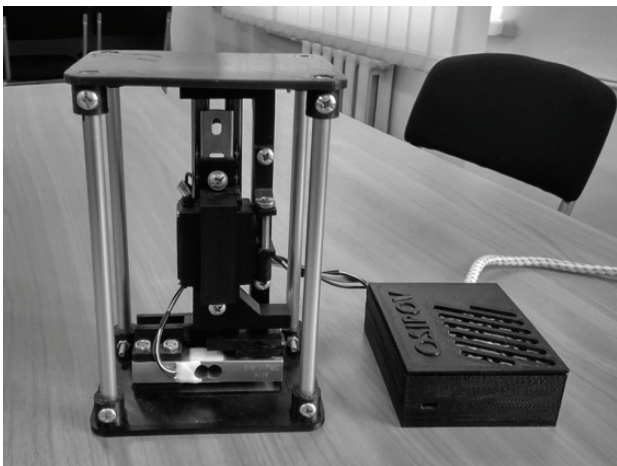


Рис. 4. Загальний вигляд установки для дослідження деформації біологічних тканин і біосумісних матеріалів при стисненні

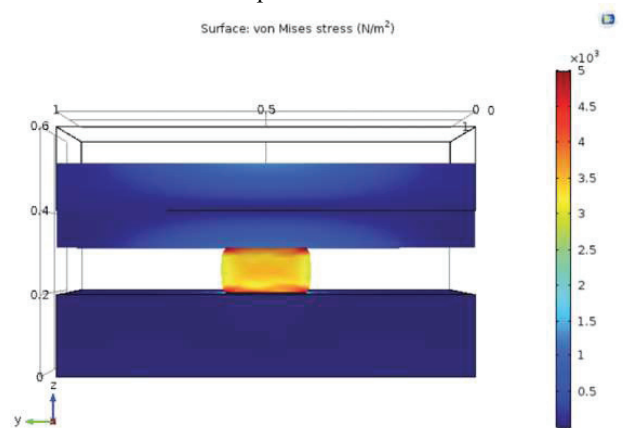


Рис. 5. Моделювання стиснення біотканини в COMSOL 5.2

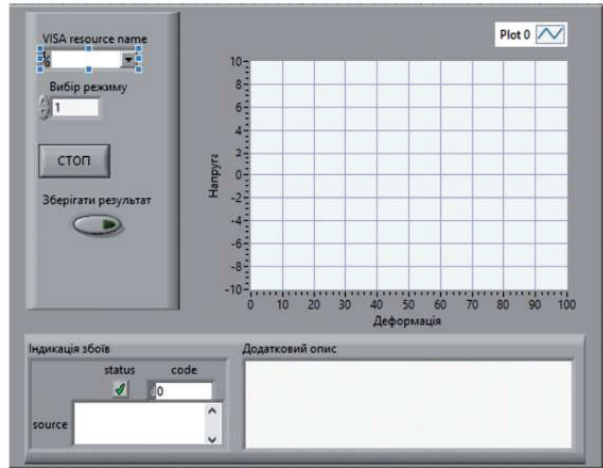


Рис. 6. Розроблений інтерфейс користувача

воду, максимальне зусилля, на яке має бути розрахований тензодавач (не менш ніж 150 Н).

Для побудови системи керування та збору даних використано апаратно-програмний комплекс Arduino Nano, який має компактні габаритні розміри та достатні для виконання покладених на нього функцій технічні характеристики. В даній установці комплекс Arduino здійснює зокрема передачу вимірюваної інформації в комп'ютер, керування рухом сервоприводу, а також живлення тензометричного давача та модуля аналого-цифрового перетворення.

Для забезпечення зручності взаємодії користувача з розробленою установкою в середовищі NI LabView було створене спеціальне програмне забезпечення (інтерфейс програми показано на рис. 6), здатне отримувати від комплексу Arduino результати дослідження та виводити на графічний дисплей діаграму деформації, зберігати отримані дані у файл типу *.xls на комп'ютері, додавати коментар дослідника до збережених файлів, показувати індикатор збою роботи програми.

Результати практичного застосування установки

За допомогою експериментальної установки було досліджено деформації зразків біологічних тканин під дією тиску. На рис. 7 наведено діаграми деформації зразків тканини курячої печінки та курячого серця. Діаграми містять пряму та зворотну ділянки, що відображають відповідно процеси стиснення та подальшого зняття тиску. Як видно з рисунків, тканина серця є більш пружною і демонструє набагато більші значення механічного напруження, ніж тканина печінки, за умов забезпечення однакових значень відносної деформації. Так, наприклад, при значенні відносної деформації 60% механічне напруження зразка печінки дорівнює 20 кПа, тоді як напруження зразка серця складає близько 140 кПа. Обидва графіки мають нелінійну залежність: на початковому етапі збільшення деформації напруження в тканинах на-

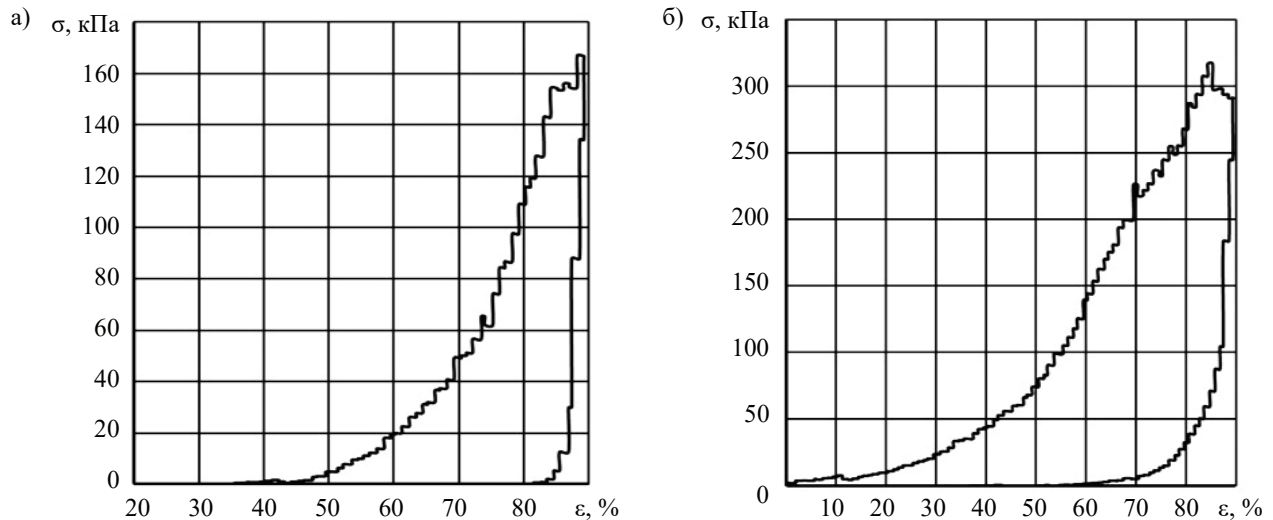


Рис. 7. Графік деформації дослідних зразків тканини курячої печінки (а) та курячого серця (б)

ростає повільно, тоді як при подальшому рості деформації напруження суттєво збільшується. Зворотні ділянки графіків не збігаються з прямими через руйнування внутрішньої структури зразків під дією тиску, в результаті чого пружні властивості тканин істотно змінюються. Нерівномірність зміни механічного напруження під дією тиску, наявність «викидів» на графіках пояснюються неоднорідністю структури біологічних тканин, які містять порожнини, заповнені повітрям та рідиною.

Отримання достовірних експериментальних даних про механічні властивості біологічних тканин та біосумісних матеріалів, в тому числі модуль пружності E , коефіцієнт поперечної деформації μ (коефіцієнт Пуассона), допустиме напруження σ тощо, є необхідною умовою для побудови адекватних математичних моделей. Важливість створення таких моделей важко переоцінити, оскільки дослідження механічних властивостей під дією тиску належать до класу методів руйнівного контролю, що в багатьох випадках означає суттєві обмеження під час проведення експериментів над живими біологічними тканинами або навіть неможливість їхньої реалізації. Ефективним математичним інструментом для створення моделей систем з розподіленими параметрами, якими є біотканини та біосумісні матеріали, вважається метод кінцевих елементів [10, 28, 29], за допомогою якого можливо розробити віртуальні об'єкти високої точності для проведення над ними надалі широкого спектра досліджень.

Висновки

Розроблена з використанням сучасних апаратних та програмних засобів, а також ефективних технічних рішень система для дослідження механічних деформацій біологічних тканин і біосумісних матеріалів при стисненні має високі метрологічні характеристики, низьку собівартість та дозволяє здійснюва-

ти всі необхідні функції з вимірювання, обробки та візуалізації даних. На основі даних, отриманих в результаті вимірювання такою системою, можуть бути сформовані рекомендації для лікарів щодо обрання оптимальних режимів роботи медичних приладів та інструментів у кожному конкретному випадку. Крім цього, вимірювані дані можуть бути використані для побудови математичних моделей біологічних тканин та біосумісних матеріалів з метою подальшого проведення над ними віртуальних експериментів. Саме створенню математичних моделей біологічних тканин на основі методу кінцевих елементів із застосуванням отримуваних за допомогою розробленої системи фактичних значень, що характеризують тканину, планується присвятити майбутні дослідження в даному напрямку.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Кузьмин А.В. Трехмерное моделирование и визуализация в медицине. *Вестник Пензенского государственного университета*, 2015, № 4 (12), с. 122–126.
2. Кузьмин А.В., Милюткин М.Г., Черепанов А.С. и др. Алгоритмы определения видимости объектов сцены при симуляционном обучении базовым навыкам лапароскопии. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*, 2013, № 3, С. 40–51.
3. Гаврюшин С.С., Утенков В.М., Хрыков С.С. Биомеханическое моделирование индивидуализированных имплантируемых изделий для реконструктивной хирургии. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 2, с. 1–13. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2017-2-1582>
4. Николаев С.Н. Программный модуль для трехмерного моделирования хирургической операции по увеличению груди. *Компьютерные инструменты в образовании*, 2012, № 3, с. 38–46.
5. Paton B.E. Welding and related technologies for medical application. *The Paton Welding Journal*, 2008, № 11, p. 11–19.
6. Патон Б.Е., Булавин Л.А., Актан О.Ю. та ін. Структурні перетворення колагену при електрозварюванні м'яких живих тканин. *Доповіді Національної академії наук України*, 2010, № 2, с. 94–101.
7. Лебедев А.В., Дубко А.Г., Лопаткина К.Г. Особенности применения теории контактной сварки металлов к сварке живых тка-

ней. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*, 2012, т. 2, с. 187–192.

8. Григорькина, Е.С., Кузьмин А.В., Сергеев С.В. Компьютерное 3D-моделирование травмирующего воздействия на верхнюю челюсть. *Практическая медицина*, 2015, № 2 (87), т. 2, с. 76–78.

9. Lam C.K., Sundaraj K., Sulaiman, M.N. Computer-based virtual reality simulator for phacoemulsification cataract surgery training. *Virtual Reality* 18, 2014, p. 281–293. <https://doi.org/10.1007/s10055-014-0251-3>.

10. Chanthasopeephan T., Desai J. P. and Lau A. C. W. Modeling soft-tissue deformation prior to cutting for surgical simulation: finite element analysis and study of cutting parameters. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2007, vol. 54, no. 3, p. 349–359, <https://doi.org/10.1109/TBME.2006.886937>.

11. Guo Z., You S., Wan X., Bićanić N. A FEM-based direct method for material reconstruction inverse problem in soft tissue elastography. *Computers and Structures*, 2010, vol. 88, iss. 23–24, p. 1459–1468. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2008.06.004>

12. Лекишвили М.В. *Технологии изготовления костного пластического материала для применения в восстановительной хирургии: автореф. дис. ... д-ра мед. наук*, Москва, 2005, 47 с.

13. Нигматуллин Р.Т. *Очерки трансплантации тканей*, Уфа, 2003, 160 с.

14. Савельев В.И., Корнилов Н.В. Калинин А.В. *Актуальные проблемы трансплантации тканей*. СПб., МорсарАВ, 2001, 157 с.

15. Gasser T.C., Ogden R.W., and Holzapfel G.A. Hyperelastic modelling of arterial layers with distributed collagen fibre orientations. *Journal of the royal society interface*, 2006, vol. 3, iss. 6, p. 15–35. <http://doi.org/10.1098/rsif.2005.0073>

16. Holzapfel G.A., Gasser T.C., and Ogden R.W. A new constitutive framework for arterial wall mechanics and a comparative study of material models. *Journal of elasticity and the physical science of solids*, 2000, vol. 61, p. 1–48. <https://doi.org/10.1023/A:1010835316564>

17. Антонюк В.С., Бондаренко М.О., Ващенко В.А. та ін. *Біофізика і біомеханіка*. Київ, НТУУ «КПІ», 2012, 344 с.

18. Лурье А.И. *Нелинейная теория упругости*. Москва, Наука, 1980, 260 с.

19. Владимиров Ю.А., Рощупкин Д.И., Потапенко А.Я., Деев А.И. *Биофизика*, Москва, Медицина, 1983, 272 с.

20. Franzke C.W., Bruckner P., and Bruckner-Tuderman L. Collagenous transmembrane proteins: recent insights into biology and pathology. *Journal of Biological Chemistry*, 2005, vol. 280, no. 6, p. 4005–4008. <https://doi.org/10.1074/jbc.r400034200>

21. Пурия Б.А., Касьянов В.А. *Биомеханика крупных кровеносных сосудов человека*. Рига, Зинатне, 1980, 260 с.

22. Юсков В.Н. *Хирургия в вопросах и ответах*. Ростов-на-Дону, Феникс, 2000, 573 с.

23. Instron — Low-Force Testing of Tissues and Biomaterials In Vitro. <https://www.instron.us/testing-solutions/by-material/biomedical/tension/tissues--biomaterials> (accessed date: 10.10.2020)

24. Yuen Q. W.-H., Zheng Y.-P., Huang Y.-P. et al. In-vitro strain and modulus measurements in porcine cervical lymph nodes. *The Open Biomedical Engineering Journal*, 2011, vol. 5, p. 39–46. <https://doi.org/10.2174/1874120701105010039>

25. Advantech USB-4716 200 kS/s, 16-Bit, 16-Ch Multifunction DAQ USB Module, https://www.advantech.com/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacedef7a (accessed date: 10.10.2020)

26. Arduino, <https://www.arduino.cc> (accessed date: 10.10.2020)

27. HX711 — 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. Datasheet, http://image.dfrobot.com/image/data/SEN0160/hx711_english.pdf (accessed date: 10.10.2020)

28. Бегун П.И., Афонин П.Н. *Моделирование в биомеханике*. Москва, Высшая школа, 2004, 390 с.

29. Nealen A., Müller M., Keiser R. et al. Physically based deformable models in computer graphics. *Computer Graphics Forum*, 2006, vol. 25, iss. 4, pp. 809–836. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2006.01000.x>

Дата надходження рукопису
до редакції 16.11 2020 р.

DOI: 10.15222/ТКЕА2020.5-6.40
УДК 620.17.05

А. Г. ДУБКО^{1, 2}, Р. С. ОСИПОВ¹, Ю. В. БОНДАРЕНКО¹, А. Ф. БОНДАРЕНКО¹

Украина, г. Киев, ¹КПИ им. Игоря Сикорского; ²ИЭС им. Е. А. Патона НАН Украины
E-mail: andreyies17@gmail.com, romanosipov1997@gmail.com, bondarenkoaf@gmail.com

ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Показана актуальность исследований механических свойств биологических тканей и биосовместимых материалов для успешного решения задач общей и восстановительной хирургии, трансплантологии, мануальной терапии, виртуального моделирования хирургических операций, роботизации хирургии и пр. Представлены основные сведения о биологической ткани как объекте исследования. Приведен краткий обзор средств для исследования механических характеристик биологических тканей. Описана разработанная с использованием современных аппаратных и программных средств, а также эффективных технических решений экспериментальная установка для исследования деформаций биологических тканей и биосовместимых материалов при сжатии. Представлены результаты практического применения разработанной установки и проанализированы полученные зависимости механического напряжения образцов биологических тканей от их деформации под действием давления. Система обладает высокими метрологическими характеристиками, низкой себестоимостью и позволяет осуществлять все необходимые функции по измерению, обработке и визуализации данных. На основе данных, полученных в результате измерения такой системой, могут быть сформированы рекомендации для врачей по выбору оптимального режима работы медицинских приборов и инструментов в каждом конкретном случае. Кроме этого, измеряемые данные могут быть использованы для построения математических моделей биологических тканей и биосовместимых материалов с целью дальнейшего проведения виртуальных экспериментов. Именно созданию математических моделей биологических тканей на основе метода конечных элементов с применением получаемых с помощью разработанной системы фактических значений, характеризующих ткань, планируется посвятить будущие исследования в данном направлении.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, измерение, механические свойства, биологическая ткань, биосовместимый материал.

ELECTRONIC DEVICES FOR STUDYING MECHANICAL PROPERTIES OF BIOLOGICAL TISSUES

The paper shows the relevance of studying the mechanical properties of biological tissues and biocompatible materials for solving the problems of general and reconstructive surgery, transplantology, manual therapy, virtual simulation of surgical operations, robotic surgery, etc. The authors present basic information about biological tissue as an object of research and give a brief overview of the devices used for studying the mechanical characteristics of biological tissues. An experimental system for testing deformations of biological tissues and biocompatible materials during compression is described. The system is developed using modern hardware and software, as well as effective technical solutions. The results of the practical use of the developed device are presented and the obtained dependences of the mechanical stress of biological tissue samples on their deformation under pressure are analyzed. The system has high metrological characteristics and low cost, and allows performing all the necessary functions for measuring, processing and visualizing the data. The measurements obtained with this system can help form the recommendations for doctors on choosing the optimal operation mode of medical devices and instruments in each specific case. In addition, the measured data can be used to create mathematical models of biological tissues and biocompatible materials in order to further carry out virtual experiments. In further studies, the authors plan to create the mathematical models of biological tissues based on the finite element method and using the actual values characterizing the tissue, obtained with the developed system.

Keywords: hardware and software complex, measurement, mechanical properties, biological tissue, biocompatible material.

REFERENCES

1. Kuz'min A.V. 3D modeling and visualization in medicine. *Penza State University Bulletin*, 2015, no. 4 (12), pp. 122–126. (Rus)
2. Kuz'min A.V., Milyutkin M.G., Cherepanov A.S. et al. Algorithms for estimation of scene objects visibility in simulation training of basic laparoscopy skills. University proceedings. Volga region. *Technical sciences*, 2013, no. 3, pp. 40–51. (Rus)
3. Gavryushin S.S., Utenkov V.M., Khrykov S.S. Biomechanical modeling of personalised implants for reconstructive surgery. *Engineering Journal: Science and Innovations*, 2017, no. 2 (62), pp. 1–13. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2017-2-1582>
4. Nikolaev S.N. [Software module for 3D modeling of breast augmentation surgery]. *Computer Tools in Education*, 2012, no. 3, c. 38–46. (Rus)
5. Paton B.E. Welding and related technologies for medical application. *The Paton Welding Journal*, 2008, no. 11, pp. 11–19.
6. Paton B.E., Bulavyn L.A., Aktan O.Yu. et al. [Structural transformations of collagen during electric welding of soft living tissues]. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2010, no. 2, pp. 94–101. (Ukr)
7. Lebedev A.V., Dubko A.G., Lopatkina K.G. Features of application of the theory of contact welding of metals to welding of living tissues. *Technical Electrodynamics. Special Issue "Power Electronics and Energy Efficiency"*, 2012, vol. 2, p. 187–192. (Ukr)
8. Grigorkina E.S., Kuzmin A.V., Sergeev S.V. Computer 3D-modeling of traumatic impact on the upper jaw. *Practical Medicine*, 2015, no. 2 (87), т. 2, c. 76–78. (Rus)
9. Lam C.K., Sundaraj K., Sulaiman, M.N. Computer-based virtual reality simulator for phacoemulsification cataract surgery training. *Virtual Reality* 18, 2014, pp. 281–293. <https://doi.org/10.1007/s10055-014-0251-3>
10. Chanthasopeephan T., Desai J. P. and Lau A. C. W. Modeling soft-tissue deformation prior to cutting for surgical simulation: finite element analysis and study of cutting parameters. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2007, vol. 54, no. 3, pp. 349–359, <https://doi.org/10.1109/TBME.2006.886937>
11. Guo Z., You S., Wan X., Bićanić N. A FEM-based direct method for material reconstruction inverse problem in soft tissue elastography. *Computers and Structures*, 2010, vol. 88, iss. 23–24, pp. 1459–1468. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2008.06.004>
12. Lekishvili M.V. *Tekhnologii izgotovleniya kostnogo plasticheskogo materiala dlya primeneniya v vosstanovitel'noy khirurgii: avtoref. dis. ... d-ra med. nauk* [Technologies for the manufacture of bone plastic material for use in reconstructive surgery: abstract of dis. ... Dr. med. sciences], Moscow, 2005, 47 p. (Rus)
13. Nigmatullin R.T. *Ocherki transplantatsii tkaney* [Essays on tissue transplantation], Ufa, 2003, 160 c. (Rus)
14. Savel'yev V.I., Kornilov N.V., Kalinin A.V. *Aktual'nyye problemy transplantatsii tkaney* [Actual problems of tissue transplantation]. SPb., Morsar AV, 2001, 157 p. (Rus)
15. Gasser T.C., Ogden R.W., and Holzapfel G.A. Hyperelastic modelling of arterial layers with distributed collagen fibre orientations. *Journal of the royal society interface*, 2006, vol. 3, iss. 6, pp. 15–35. <http://doi.org/10.1098/rsif.2005.0073>
16. Holzapfel G.A., Gasser T.C., and Ogden R.W. A new constitutive framework for arterial wall mechanics and a comparative study of material models. *Journal of elasticity and the physical science of solids*, 2000, vol. 61, pp. 1–48. <https://doi.org/10.1023/A:1010835316564>
17. Antonyuk V.S., Bondarenko M.O., Vashchenko V.A. et al. *Biophysica i biomekhanicsa* [Biophysics and biomechanics]. Kyiv, NTUU "KPI", 2012, 344 p. (Ukr)
18. Lur'ye A.I. *Nelineynaya teoriya uprugosti* [Nonlinear theory of elasticity]. Moscow, Nauka, 1980, 260 p. (Rus)
19. Vladimirov Yu.A., Roshchupkin D.I., Potapenko A.Ya., Deyev A.I. *Biophysica*, [Biophysics]. Moscow, Meditsina, 1983, 272 p. (Rus)
20. Franzke C.W., Bruckner P., Bruckner-Tuderman L. Collagenous transmembrane proteins: recent insights into biology

and pathology. *Journal of Biological Chemistry*, 2005, vol. 280, no. 6, pp. 4005–4008. <https://doi.org/10.1074/jbc.r400034200>

21. Purinya B.A., Kas'yanov V.A. *Biomechanika krupnykh krovynosnykh sosudov cheloveka* [Biomechanics of human large blood vessels]. Riga, Zinatne, 1980, 260 p.

22. Yuskov V.N. *Khirurgiya v voprosakh i otvetakh* [Surgery in questions and answers]. Rostov-on-Don, Feniks, 2000, 573 p.

23. Instron — *Low-Force Testing of Tissues and Biomaterials In Vitro*. <https://www.instron.us/testing-solutions/by-material/biomedical/tension/tissues--biomaterials> (accessed date: 10.10.2020)

24. Yuen Q. W.-H., Zheng Y.-P., Huang Y.-P. et al. In-vitro strain and modulus measurements in porcine cervical lymph nodes. *The Open Biomedical Engineering Journal*, 2011, vol. 5, pp. 39–46. <https://doi.org/10.2174/1874120701105010039>

25. *Advantech USB-4716 200 kS/s, 16-Bit, 16-Ch Multifunction DAQ USB Module*, https://www.advantech.com/products/1-2mlkno/usb-4716/mod_a3ab933c-c6d3-49eb-9d25-58cacecdef7a (accessed date: 10.10.2020)

26. *Arduino*, <https://www.arduino.cc> (accessed date: 10.10.2020)

27. *HX711 — 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. Datasheet*, http://image.dfrobot.com/image/data/SEN0160/hx711_english.pdf (accessed date: 10.10.2020)

28. Begun P.I., Afonin P.N. *Modelirovaniye v biomekhanike* [Modeling in biomechanics]. Moscow, Vysshaya shkola 2004, 390 p.

29. Nealen A., Müller M., Keiser R. et al. Physically based deformable models in computer graphics. *Computer Graphics Forum*, 2006, vol. 25, iss. 4, pp. 809–836. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2006.01000.x>

Опис статті для цитування:

Дубко А. Г., Осіпов Р. С., Бондаренко Ю. В., Бондаренко О. Ф. Електронні засоби дослідження механічних властивостей біологічних тканин. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2020, № 5–6, с. 40–47. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.40>

Cite the article as:

Dubko A. G., Osypov R. S., Bondarenko Yu. V., Bondarenko O. F. Electronic devices for studying mechanical properties of biological tissues. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 5–6, pp. 40–47. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.40>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Белоха Галина Сергіївна, канд. техн. наук, доцент, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Сєверодонецьк

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

Круковський Семен Іванович, докт. техн. наук, начальник відділку, НВП «Електрон-Карат», м. Львів

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

Поплавко Юрій Михайлович, докт. фіз.-мат. наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ ЖУРНАЛУ «ТКЕА»

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

2. В журналі публікуються рукописи прикладного характеру, які стосуються питань електроніки.

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

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

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

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

- опис проблеми з аналізом публікацій за останні 5 років та обґрунтуванням необхідності проведення дослідження;
- чітко сформульована мета роботи;
- основна частина з обговоренням та інтерпретацією результатів;
- висновки.

Крім цього, редакцію цікавить можливість практичного використання результатів досліджень.

7. Готуючи статтю, слід звернути увагу на наступне:

- назва, мета роботи та висновки мають бути узгоджені між собою;
- назва має бути чіткою, інформативною і водночас по можливості короткою;
- ключові слова підбираються так, щоб ймовірність знаходження статті через пошукові системи була якомога вищою;
- анотація на початку статті має бути досить лаконічною (до 100 слів), демонструвати, що зроблено у роботі, а також містити усі наведені ключові слова;
- вступ знайомить читача з областю досліджень, показує актуальність проведення роботи та закінчується чітко сформульованою метою. Тут необхідно привести огляд літератури за обраною тематикою, вказавши на проблеми, які потребують додаткового вивчення і які вирішуються в представленій роботі;
- основна частина може містити такі розділи, як «Зразки для досліджень», «Методика досліджень», «Результати досліджень і їхнє обговорення» та ін.;
- висновки не мають повторювати анотацію — тут потрібно показати, що заявлену мету досягнуто, навести результати роботи та рекомендації щодо їх практичного використання, а також визначити основні напрями подальших досліджень.

8. Список «Використані джерела» (див. зразок на сайті) формується в порядку згадування джерел у тексті та оформляється відповідно до наведених нижче вимог.

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

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

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

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

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

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

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

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

Підписано до друку 27.12 2020 р. Формат 60×84 1/8. Друк. арк. 7,5. Тираж 100 прим. Зам. № 125/126

Оригінал-макет виготовлено в видавництві «Політехперіодика»

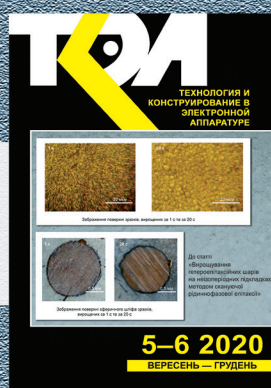
Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3232 від 09.07.2008 р.

(65044, м. Одеса, а/с 17)

Надруковано ФОП Побута М. І. з готового оригінал-макету

(65044, м. Одеса, пр-т. Шевченка, 1а)

*Номер готували
Дніпро, Київ, Львів,
Севєродонецьк, Херсон, Чернівці.*



Пишіть
Передплачуйте
Читайте