

Технология и конструирование в электронной аппаратуре

К статье
«Имитатор сигналов
для индикатора
кругового обзора
ПИКЕТ»



3 2017

МАЙ — ИЮНЬ

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

ISSN 2225-5818

Регистрационный номер КВ 21788-11688ПР

Выходит один раз в 2 месяца

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

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев)
Включен в международную справочную систему по периодическим и продолжающимся изданиям
"Ulrich's Periodicals Directory" (США),
в международную систему библиографических ссылок CrossRef,
в наукометрическую базу РИНЦ научной электронной библиотеки России,
в базу данных DOAJ, в Google Scholar

*Номер выпущен при поддержке
НПП «Сатурн», (г. Киев),
ЧАО «Украналит» (г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)*

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

В Украине	Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
В России	Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
В Белоруссии	Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 23785.
В редакции «ТКЭА» можно подписаться с любого номера.	

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.
E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048)728-18-50, 728-49-46.

Редакция: *Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.*
Техническая редакция, дизайн: *Е. И. Корецкая.*

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2017

№ 3

Год издания 41-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. А. Е. Беляев (г. Киев)

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)

Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)

К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)

Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)

Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антощук (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)

Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)

Д.т.н. А. П. Бондарев (г. Львов)

К.т.н. Э. Н. Глушеченко (г. Киев),

зам. главного редактора

Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)

Д.т.н. А. А. Дружинин (г. Львов),

К.т.н. И. Н. Еримичой (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ефименко (г. Одесса),

зам. главного редактора

Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)

Д.т.н. С. И. Круковский (г. Львов)

Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. В. С. Лысенко (г. Киев)

К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)

Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)

Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)

Д.ф.-м.н. С. В. Плаксин (г. Днепр)

К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)

К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)

К.т.н. П. С. Сафронов (г. Одесса),

отв. секретарь редколлегии

Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)

Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)

Д. т. н. З. Стевич (г. Белград)

Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)

К.т.н. В. Е. Трофимов (г. Одесса)

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт физики полупроводников

им. В. Е. Лашкарёва

Научно-производственное

предприятие «Сатурн»

Одесский национальный

политехнический университет

Издательство «Политехпериодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 12 от 27.06 2017 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

СОДЕРЖАНИЕ

Электронные средства: исследования, разработки

Адаптивная электротепловая защита полупроводниковых преобразователей электроэнергии. *Г. А. Баранюк, В. А. Тодоренко, А. Ф. Бондаренко (на украинском)*

3

СВЧ-техника

Проектирование микрополосковых СВЧ-фазовращателей для антенных решеток. *Э. Н. Глушеченко*

12

Системы передачи и обработки сигналов

Имитатор сигналов для индикатора кругового обзора «Пикет». *И. В. Цевух, А. Н. Шейк-Сейкин, А. В. Садченко, О. А. Кушниренко, Ю. А. Савчук*

19

Сенсоэлектроника

Чувствительный элемент двухфункционального сенсора магнитного поля и деформации на основе микрокристаллов Si<B, Ni>. *А. А. Дружинин, Ю. Н. Ховерко, А. П. Кутраков, Р. Н. Корецкий, С. Ю. Яцухненко (на украинском)*

24

Функциональная микро- и наноэлектроника

Влияние разброса значений электрических параметров RGB-светодиодов на однородность свечения светодиодных экранов при минимальной градации яркости. *В. П. Велещук, А. И. Власенко, З. К. Власенко, В. В. Шинкаренко, Я. Я. Кудрик, П. О. Сай, В. В. Бориц*

30

Обеспечение тепловых режимов

Теплоаккумулирующая панель для поддержания микроклимата в помещении с радиоэлектронным оборудованием. *В. Е. Трофимов*

36

Материалы электроники

Влияние электронного облучения на оптические свойства пленок нанокристаллического SiC на подложках из монокристалла Al₂O₃. *А. В. Семенов, А. В. Лопин, В. Н. Борискин*

40

Метрология. Стандартизация

Применение энтропийного коэффициента для оптимизации числа интервалов при интервальных оценках. *А. Н. Тыныныка*

49

Список рецензентов номера

54

Рекомендации авторам

55

Новые книги

18, 39

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Адаптивний електротепловий захист напівпровідникових перетворювачів електроенергії. *Р. А. Баранюк, В. А. Тодоренко, О. Ф. Бондаренко* (3)

НВЧ-техніка

Проектування мікросмужкових НВЧ-фазообертачів для антенних ґраток. *Е. М. Глушеченко* (12)

Системи передавання та обробки сигналів

Імітатор сигналів для індикатора кругового огляду «Пікет». *І. В. Цевух, А. М. Шейк-Сейкін, А. В. Садченко, О. А. Кушніренко, Ю. О. Савчук* (19)

Сенсоелектроніка

Чутливий елемент двофункційного сенсора магнітного поля та деформації на основі мікрокристалів Si<B, Ni>. *А. О. Дружинін, Ю. М. Ховерко, О. П. Кутраков, Р. М. Корецький, С. Ю. Яцухненко* (24)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Вплив розкиду значень електричних параметрів RGB-світлодіодів на однорідність свічення світлодіодних екранів при мінімальній градації яскравості. *В. П. Велешук, О. І. Власенко, З. К. Власенко, В. В. Шинкаренко, Я. Я. Кудрик, П. О. Сай, В. В. Борщ* (30)

Забезпечення теплових режимів

Теплоакumuлююча панель для підтримки мікроклімату в приміщенні з радіоелектронним обладнанням. *В. Є. Трофімов* (36)

Матеріали електроніки

Вплив електронного опромінення на оптичні властивості плівок нанокристалічного SiC на підкладках з монокристалічного Al₂O₃. *О. В. Семенов, О. В. Лопін, В. Н. Боріскін* (40)

Метрологія. Стандартизація

Застосування ентропійного коефіцієнта для оптимізації числа інтервалів при інтервальних оцінках. *О. М. Тининика* (49)

CONTENTS

Electronic devices: research, development

Adaptive electrothermal protection means for semiconductor converters. *R. A. Baranjuk, V. A. Todorenko, O. F. Bondarenko* (3)

Microwave engineering

Design of microstrip microwave phase shifters for antenna arrays. *E. N. Glushechenko* (12)

Signals transfer and processing systems

Imitator of signals for plan-position indicator «Picket». *I. V. Tsevuch, A. N. Sheik-Seikin, A. V. Sadchenko, O. A. Kushnirenko, Yu. A. Savchuk* (19)

Sensors

Two-functional sensor of magnetic field and deformation based on Si<B, Ni> microcrystals. *A. A. Druzhinin, Yu. M. Khoverko, A. P. Kutrakov, R. M. Koretskii, S. Yu. Yatsukhnenko* (24)

Functional micro- and nanoelectronics

Influence of variation of electrical parameters values of RGB LEDs on the radiation uniformity of LED displays at minimal luminosity grade. *V. P. Veleschuk, O. I. Vlasenko, Z. K. Vlasenko, V.V. Shynkarenko, Ya. Ya. Kudryk, P. O. Sai, V. V. Borshch* (30)

Thermal management

Thermal-accumulating panel for microclimate support in a room with radioelectronic equipment. *V. Ye. Trofimov* (36)

Materials of electronics

Effect of electron irradiation on the optical properties of nanocrystalline SiC films on single crystal Al₂O₃ substrates. *A. V. Semenov, A. V. Lopin, V. N. Boriskin* (40)

Metrology. Standardization

Application of the entropic coefficient for optimization of intervals number during interval assessment. *A. N. Tynynyka* (49)

Р. А. БАРАНЮК, к. т. н. В. А. ТОДОРЕНКО, к. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: licornedev@gmail.com, va.todorenko@gmail.com, bondarenkoaf@gmail.com

АДАПТИВНИЙ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИЙ ЗАХИСТ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Запропоновано системи теплового захисту імпульсних напівпровідникових перетворювачів електроенергії. Показано, що в напівпровідникових перетворювачах з вихідним згладжувальним фільтром доцільно використовувати схемотехнічні засоби теплового захисту, дія яких базується на нормалізації параметрів згладжувального фільтра залежно від температури, а для випадків, коли достатньо вірогідними є короткі замикання, — на адаптації сталої часу системи плавного запуску до зміни температури. Результати моделювання суміщених електромагнітних та теплових процесів у широтно-імпульсному перетворювачі знижувального типу із запропонованими системами теплового захисту в об'єднаному середовищі PLECS-MATLAB-Simulink показали можливість суттєвого зменшення теплового удару по кристалу транзистора. Результати підтверджено випробуваннями на реальних пристроях.

Ключові слова: диференціальні рівняння, стан системи, електротеплова модель, перехідні процеси, джерело живлення.

Забезпечення теплового захисту напівпровідникових перетворювачів електроенергії в процесі їх експлуатації при повторному ввімкненні, коли компоненти є розігрітими, є актуальною задачею. Особливо важливим це може бути для перетворювачів, що працюють в повторно-короткочасному режимі роботи, як, наприклад, джерела живлення для контактного зварювання. При цьому необхідно забезпечити такі умови безаварійної роботи пристрою під час перехідних процесів, які при зміні навантаження та при короткому замиканні враховували б зміну значень параметрів компонентів та зниження максимально допустимих значень параметрів кристалу напівпровідникових компонентів внаслідок їх нагріву. Згідно з результатами досліджень [1–3] майже 60% виходів з ладу пристроїв перетворювальної техніки пов'язані з перегрівом, при цьому підвищення температури на 10°C призводить до подвоєння інтенсивності виходу приладу з ладу.

До параметрів напівпровідникових компонентів, які обмежуються максимально допустимими значеннями, відносяться наступні:

— середній струм за певної температури або типу охолодження;

— струм робочого перевантаження (при постійному протіканні він зумовлює постійне підвищення температури пасивного компонента або кристалу напівпровідникового компонента), його необхідно регулювати в таких часових межах, які дозволять уникнути перегріву;

— ударний струм (внаслідок його дії температура виходить за рамки максимально допустимої, але це відбувається достатньо рідко та з обмеженою кількістю повторів і викликано аваріями на певних ділянках кола), захисним показником тут є значення часового інтегралу від квадрату величини ударного струму;

— імпульсна напруга;
— напруга пробою активних елементів;
— час вмикання/вимикання активних елементів.

Струми робочого перевантаження, якщо вони не призводять до підвищення температури $p-n$ переходу вище критичної, можуть виникати багаторазово. Щодо кількості ударних струмів, які може витримати прилад, в параметрах напівпровідникових елементів такі дані зазвичай не вказуються, а на практиці вона в середньому на рівні 20.

Задачею даної роботи є забезпечення такого теплового захисту напівпровідникових перетворювачів електроенергії, який би не перешкоджав їх безперебійній роботі, а при спрацюванні не відключав їх від живлення.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ №0116U006924).

Моделювання теплового захисту

Для точного моделювання перехідних електротеплових процесів необхідно розділити електричну і теплову складові моделі, оскільки спільний розрахунок короточасних електромагнітних процесів і довготривалих теплових процесів призведе до накопичення похибки моделювання. В [4] запропоновано відокремлювати теплову модель на кінцевих елементах моделювання. Згідно даного методу розроблено електричний симулятор, який здатний використовувати складену у [5] теплову модель. Проте в цих роботах не реалізовано зворотний зв'язок від теплової моделі до електричної, хоча на необхідність цього вказується в задачах. Робота [6] присвячена створенню моделі для прогнозування теплового стану пристрою з пасивним тепловідводом. В ній проведено аналіз залежності теплопровідності від вхідної потужності та досліджено залежність похибки теплового моделювання від ступеню апроксимації.

Отримаємо розширені рівняння стану системи, які дозволять виконувати покроковий розрахунок електромагнітних та теплових процесів в перетворювачах.

Рівняння стану системи має вигляд [7, 8]

$$\frac{dX}{dt} = AX + B, \quad (1)$$

де X — вектор змінних стану;
 A — матриця коефіцієнтів;
 B — вектор вхідних впливів;
 t — час.

Для розрахунку сумішених електротеплових процесів необхідно зв'язати рівняння стану системи для електромагнітних та теплових процесів, тобто диференціальне рівняння (1) перетворюється в систему диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dX_E}{dt} = A_E X_E + B_E; \\ \frac{dX_{T^\circ}}{dt} = A_{T^\circ} X_{T^\circ} + B_{T^\circ}, \end{cases} \quad (2)$$

перше з яких відноситься до електромагнітних процесів (позначення з індексами E), друге — до теплових (з індексами T°).

В даній системі рівнянь матриці коефіцієнтів та вектори зовнішнього впливу не є статичними коефіцієнтами, як в рівнянні стану системи, а залежать від температурного та електромагнітного стану системи, тобто

$$\begin{cases} \frac{dX_E}{dt} = A_E(X_{T^\circ}) \cdot X_E + B_E(X_{T^\circ}); \\ \frac{dX_{T^\circ}}{dt} = A_{T^\circ}(X_E) \cdot X_{T^\circ} + B_{T^\circ}(X_E). \end{cases} \quad (3)$$

Оскільки теплові процеси є нешвидкоплинними, зміну параметрів матриць коефіцієнтів та вектору зовнішнього впливу можна розраховувати не постійно, а в кінці кожного періоду:

$$\begin{cases} \frac{dX_E}{dt} = A_E[nT] \cdot X_E + B_E[nT]; \\ \frac{dX_{T^\circ}}{dt} = A_{T^\circ}[nT] \cdot X_{T^\circ} + B_{T^\circ}[nT], \end{cases} \quad (4)$$

де $n = 0, 1, \dots$;

T — період роботи перетворювача.

Системи диференціальних рівнянь у такому вигляді дозволяє суміщати декілька методів розрахунку електротеплових процесів та використовувати декілька середовищ моделювання для розрахунку сумішених електротеплових процесів. В даному випадку диференціальне рівняння стану системи для електромагнітних процесів розв'язується методом різницьових рівнянь за допомогою середовища MATLAB-Simulink, а для теплових процесів — методом припасовування в середовищі теплового моделювання PLECS. Пакет програм PLECS дозволяє розраховувати теплове поле перетворювача, нагрів активних компонентів схеми та роботу схеми з тепловідводом, а вихідним параметром, який використовується в рівнянні електромагнітних процесів, є потужність розсіювання на кристалах напівпровідникових приладів в кінці кожного періоду роботи перетворювача $P[nT]$ та температура пасивних компонентів.

У випадку розрахунку електромагнітних процесів в MATLAB-Simulink матриця A є погано обумовленою, оскільки до неї входять залежні від температури компоненти. Внаслідок цього в одній й тій самій матриці необхідно проводити розрахунок як перехідних процесів тривалістю в мікросекунди, так і теплових, які тривають кілька годин. Тому для простоти розрахунків матриці розділяються, а в складних схемах перетворювачів, коли не вдається просто розділити дані моделі, можна використовувати методи діакоптики [9]. В даному випадку рівняння стану системи можна розширити додаванням теплової компоненти, тоді вони набувають вигляду

$$\frac{dX}{dt} = (A_e + A_t \xi) X + B, \quad (5)$$

де A_e — компонентна матриця, що відповідає експлуатації пристрою при температурі 25°C;
 A_t — матриця значень електричних параметрів компонентів, змінених внаслідок нагріву;
 ξ — матриця теплових коефіцієнтів, які залежать від $P[nT]$.

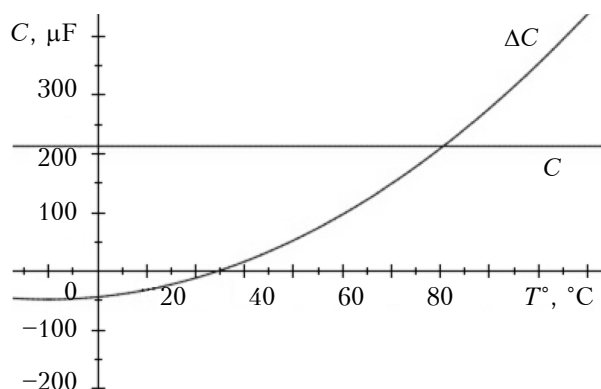


Рис. 1. Теплове розкладання ємності конденсатора: C — електрична складова матриці коефіцієнтів; $^{\circ}C$ — розрахована регресійним методом теплова складова

Приклад розкладеної таким чином характеристики — ємності конденсатора Epcos B43415 [10] — наведено на **рис. 1**.

За даним підходом, розклавши параметри компонентів схеми на теплову і електричну складові, отримуємо дві добре обумовлені матриці. Розв'язанням даної диференційної системи є вираз, у якому перебіг перехідного процесу імпульсного перетворювача характеризує матрична експонента e^{At} , форма якої, в свою чергу, визначається власними значеннями λ матриці A . Якщо власні значення матриці є дійсними, перехідний процес має аперіодичний характер, що запобігає виникненню аварій і дозволяє уникати ударів струму та небезпечних теплових ударів по кристалу напівпровідникових приладів. За комплексних власних значень процес є коливальним, ступінь коливальності при цьому залежить від відстані даних значень до комплексної осі. Рішення рівнянь для двох добре обумовлених матриць [11–13] знаходиться як

$$\det(A - \lambda I) = \lambda^2 + b\lambda + c = 0, \quad (6)$$

де I — одинична матриця 2-го порядку;
 b , c — стандартні коефіцієнти квадратного рівняння за формулами Вієта.

Використовуючи середнє геометричне значення $\Omega = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2}$, запишемо цей вираз як

$$\lambda^2 + \frac{b}{\Omega} \Omega \lambda + \Omega^2 = \lambda^2 + B\Omega \lambda + \Omega^2 = 0, \quad (7)$$

де B характеризує криву перехідного процесу, а Ω — його масштаб часу.

За допомогою рівняння (7) можна, змінюючи параметри компонентів схеми, регулювати форму перехідного процесу, наприклад, для запобігання аварій: збільшуючи величину Ω та зменшуючи внаслідок цього ступінь коливальності,

отримаємо замість небезпечного коливального процесу аперіодичний процес.

Аналіз аварійних ділянок роботи перетворювачів

З метою підвищення надійності було проведено дослідження аварійних електротеплових режимів роботи електрокоагуляторів, що належать до трьох груп — які серійно вироблялись раніше та знаходяться на післягарантійному обслуговуванні («Надія-2», ЕХВЧ 350М/120Б); які випускаються в теперішній час («Надія-4», ЕХВЧ-300, 200, 120) та новий прилад, що пройшов етап технічних випробувань («Свармед», ЕК300М). Ці прилади мають спільну платформу силової частини, структурну схему якої зображено на **рис. 2**. Силу частину електрокоагуляторів виконано на основі дволанкового перетворювача частоти, що живиться від мережі змінного струму 220 В, 50 Гц та формує на виході змінну напругу частотою 440 кГц.

Даний пристрій складається з двох каскадів: АС/DC-перетворювача, виконаного на базі регульованого напівмостового інвертора напруги, і нерегульованого мостового DC/АС-інвертора. До складу вхідного регульованого АС/DC-перетворювача входять випрямляч В1 мережі живлення (220 В, 50 Гц), ємнісний С-фільтр, з виходу якого стала напруга поступає на напівмостовий інвертор І1 з системою керування та пристроєм плавного пуску (СПП). З вихідного трансформатора Т змінна напруга поступає на випрямляч В2 та LC-фільтр. До виходу фільтру підключено вхід нерегульованого мостового інвертора І2. Для контролю струмів транзисторів інверторів в схему додатково введені два низькоіндуктивних шунти, один з яких включено послідовно зі стійкою транзисторів інвертора І1, другий — в шину живлення інвертора І2.

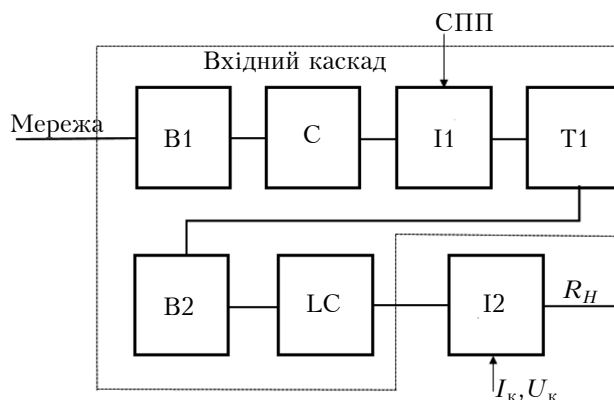


Рис. 2. Структура електрокоагулятора: В1, В2 — випрямлячі; І1, І2 — інвертори; С — С-фільтр; LC — LC-фільтр; Т1 — трансформатор

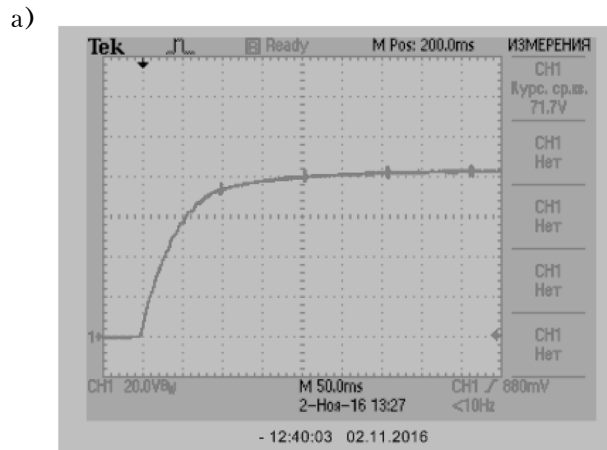


Рис. 3. Вихідна напруга (а) та струм через транзистори (б) напівмостового інвертора І1

Специфіка застосування електрокоагуляторів пов'язана з такими особливостями, як повторювана короткочасна робота та робота в режимах з неперіодичними короткими замиканнями навантаження. Під час ввімкнення пристрою, навіть за умови забезпечення аперіодичного типу зміни напруги на ємності LC-фільтру регульованого інвертора напруги, спостерігається коливальний характер зміни струму транзисторів (рис. 3).

Для другої ланки перетворювача частоти небезпечними є коротке замикання або зміна навантаження як частковий випадок короткого замикання. На рис. 4 зображено, як зміна навантаження призводить до зміни напруги на ємності LC-фільтру та як внаслідок цього формується сплеск струму транзисторів другого інвертора.

Наявність сплесків струму призводить до виникнення теплових ударів по кристалах транзисторів першого та другого інверторів.

Задачу забезпечення одночасного електротеплового захисту в такому дволанковому перетворювачі неможливо вирішити, розглядаючи роздільно аварійні режими роботи окремих інверторів. Наприклад, якщо розглядати перший

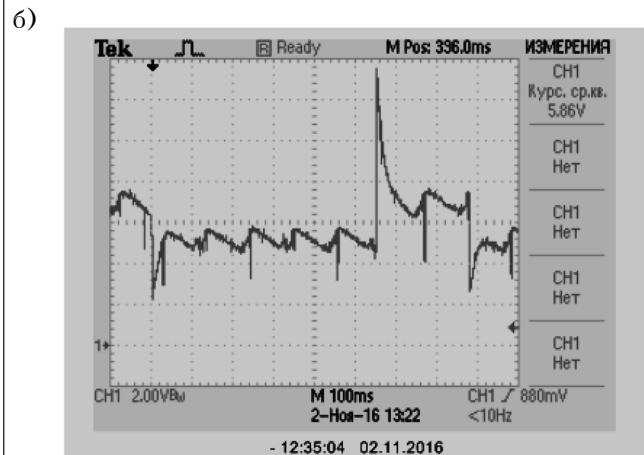
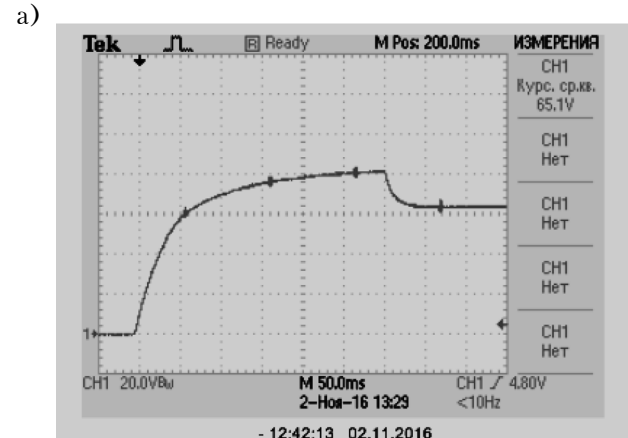


Рис. 4. Вихідна напруга (а) та струм через транзистори (б) мостового інвертора І2

інвертор, то для зменшення амплітуди сплеску струму транзисторів доцільно збільшити сталу часу перехідного процесу, збільшивши номінальні значення індуктивності дроселя та ємності LC-фільтру. Можна також використовувати режим заряду ємності стабілізованим струмом, що також призведе до збільшення сталої часу перехідного процесу. Проте у другому інверторі такі заходи призведуть до ускладнень — збільшення сплесків струму.

Аналіз режимів роботи вихідного каскаду показав, що при зміні параметрів пасивних компонентів внаслідок нагріву, стрибки струму через напівпровідникові ключі під час зміни навантаження зростають і можуть перевищити граничні значення, які зменшуються внаслідок нагріву кристалів. Тому необхідно провести моделювання поведінки пристрою у всьому температурному діапазоні роботи пасивних компонентів та обрати активні компоненти з урахуванням можливого зниження максимально допустимих значень електричних параметрів їх напівпровідникових елементів.

Дослідження вхідного каскаду показало, що у випадку нагрітих компонентів присутні коливання навіть за наявності системи плавного пуску жорсткого типу з незмінною сталою часу спрацювання. Експоненціальна зміна тривалості імпульсу не залежить від теплової зміни електричних параметрів компонентів. Програмна зміна тривалості плавного пуску усуває дану проблему, і стрибки струму зникають.

Схемотехнічні засоби забезпечення теплового захисту напівпровідникових перетворювачів електроенергії

Використання теплових моделей компонентів схеми дозволило створити систему теплового захисту імпульсних перетворювачів електроенергії, яка працює за принципом зворотного зв'язку щодо температури (рис. 5). Дана систе-

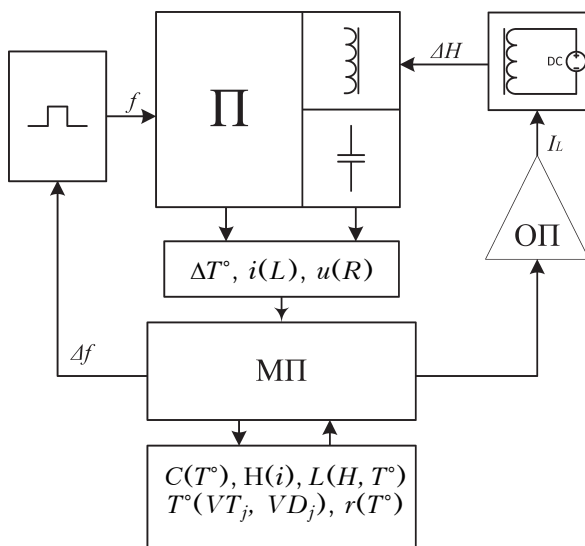


Рис. 5. Система теплового захисту зі зворотнім зв'язком за температурою

ма регулює коливальність перехідних процесів в імпульсних напівпровідникових перетворювачах електроенергії з індуктивними компонентами. Тепловий захист перетворювача здійснюється магнітно-зв'язаною з дроселем фільтра перетворювача котушкою індуктивності, струм якої, так само як і вхідна частота перемикання вхідного ключа, регулюється мікроконтролером залежно від нагріву компонентів. Внаслідок роботи даного кола стабілізуються електромагнітні процеси при зміні робочої температури компонентів імпульсних перетворювачів електроенергії.

На мікроконтролер подаються дані з датчиків температури пасивних компонентів, температури корпусу активних компонентів та струму через котушку індуктивності перетворювача (П на рис. 5) з індуктивно-ємнісним фільтром. Для поточної температури за допомогою теплової моделі, яка попередньо занесена в пам'ять мікропроцесора (МП), розраховуються параметри конденсаторів, насиченість магнітного поля котушки індуктивності та значення індуктивності, температура кристалів напівпровідникового приладу. Для отриманих даних аналізується ступінь коливальності перехідного процесу (за значеннями дійсних і комплексних коренів характеристичного рівняння). Далі розраховується напруженість магнітного поля котушки індуктивності, за якою величина коливальної складової перехідного процесу буде в припустимих межах відповідно до максимально допустимих значень параметрів нагрітих напівпровідникових кристалів. В коло з магнітно-зв'язаною котушкою індуктивності, яка регулює насиченість магнітного поля дроселя фільтра ΔH , подається струм необхідної величини I_L , підсилений за допомогою операційного підсилювача (ОП). Якщо вна-

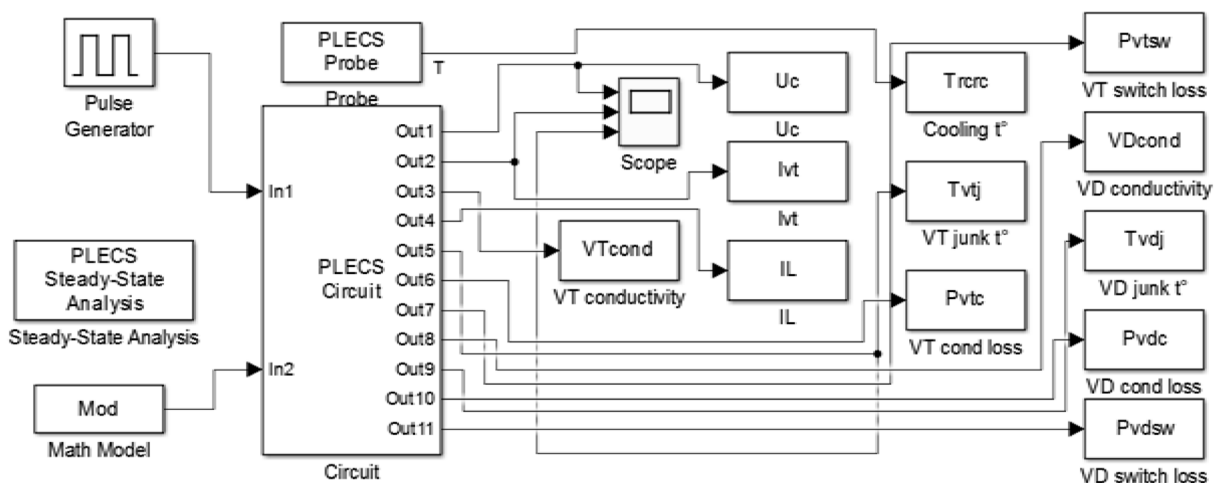


Рис. 6. Схема моделі понижуючого ШІП з системою теплового захисту

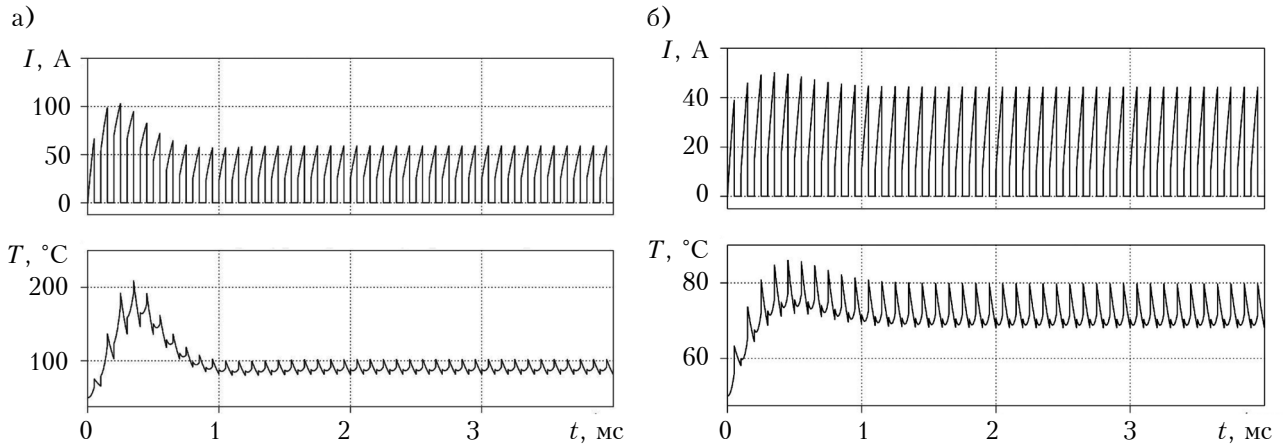


Рис. 7. Перехідні характеристики перетворювача за відсутності системи теплового захисту (а) та за її наявності (б)

слідок зміни індуктивності котушки струм кола збільшився або є необхідність у невеликій корекції реактивного опору пасивних компонентів кола, ці величини корегуються зміною частоти перемикання силового транзистора перетворювача. Сигнал, який містить інформацію про необхідну величину зміни цієї частоти, розраховується у МП та подається на формувач імпульсів, який здійснює безпосереднє керування силовим транзистором перетворювача з частотою f .

Для перевірки працездатності системи створено модель понижуючого широтно-імпульсного перетворювача (ШІП) з системою теплового захисту в середовищах PLECS [13] та MATLAB-Simulink [14] за умов високого ступеню коливальності струму напівпровідникових приладів (рис. 6). Теплова модель з системи PLECS через виходи Out передає значення потужності розсіювання, втрат та температури компонентів схеми в середовище MATLAB-Simulink та

приймають звідти корекцію входної частоти та струму через зустрічно підключений дросель.

На рис. 7 продемонстровано, як розрізняються між собою перехідні характеристики (струм I через кристал транзистора та його температура T°) перетворювача за відсутності та у разі наявності системи теплового захисту.

Забезпечення теплового захисту перезапуском системи плавного пуску після короткого замикання

Після зміни навантаження або зняття короткого замикання повторний запуск пристрою здійснюється без системи плавного пуску, але в умовах нагрітих компонентів схеми це доволі небезпечно, тому є необхідність в системі, що буде перезапускати СПП. При цьому, однак, у разі короткого замикання СПП зі стабільною зміною коефіцієнта заповнення імпульсів може бути неефективною, оскільки вона розрахована на значення параметрів компонентів за по-

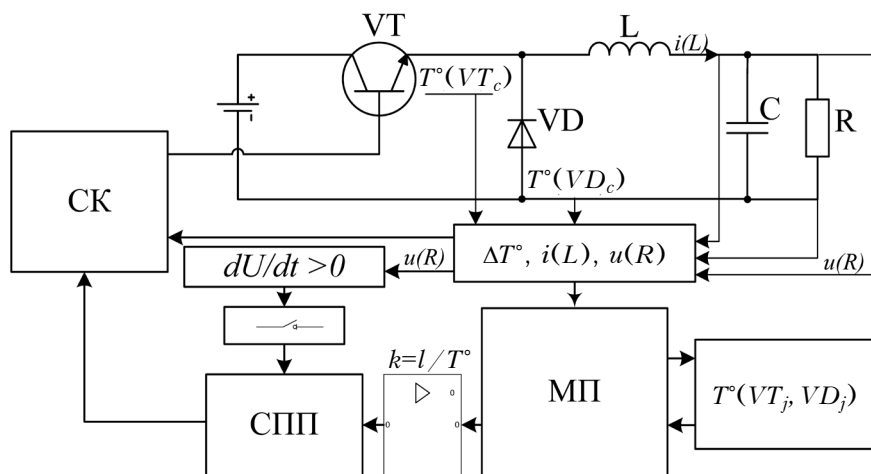


Рис. 8. Система теплового захисту з перезапуском системи плавного пуску

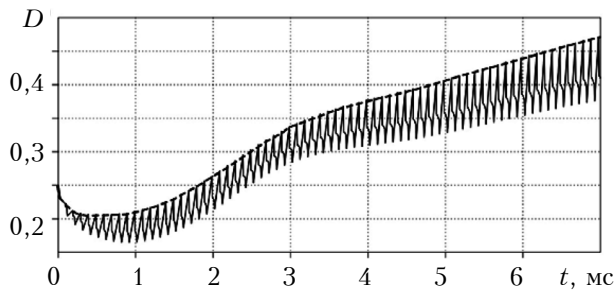


Рис. 9. Коефіцієнт заповнення імпульсів при активованій системі плавного пуску зі зворотнім зв'язком по температурі кристалу напівпровідникових приладів

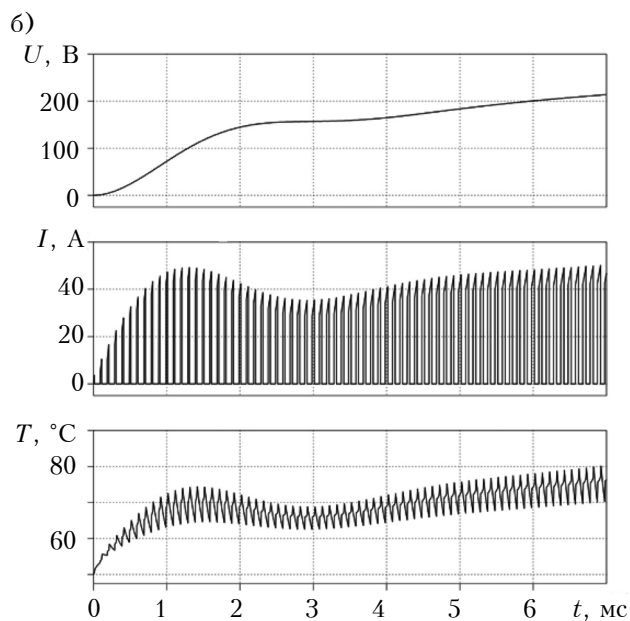
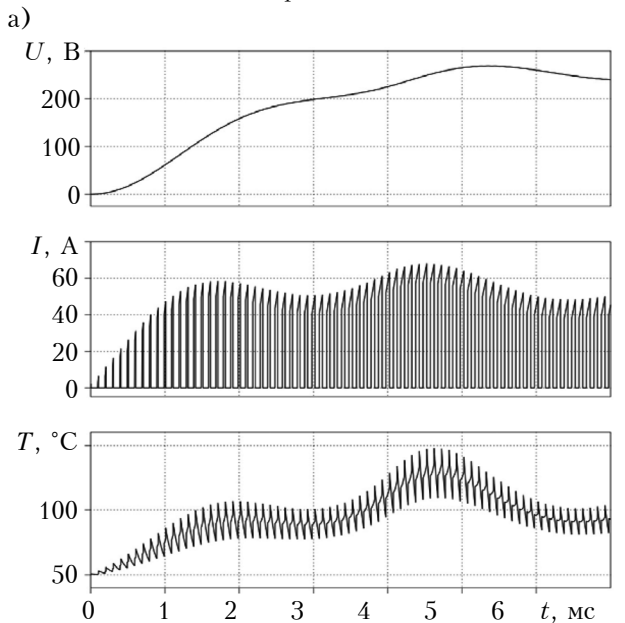


Рис. 10. Перехідні характеристики понижуючого ШПП з нагрітими компонентами у разі застосування звичайної системи плавного пуску (а) та системи, залежної від температури (б)

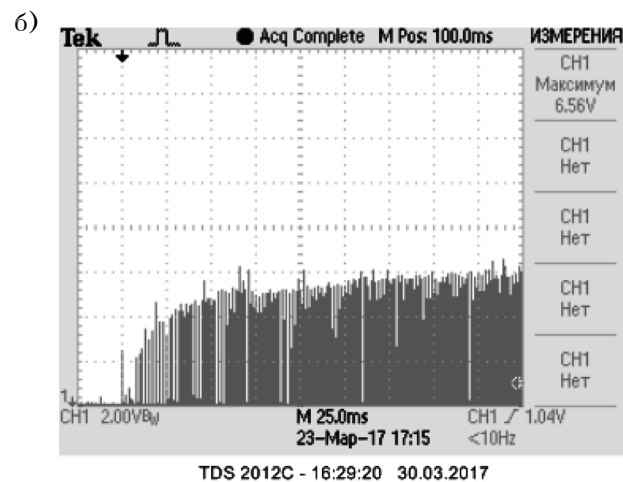
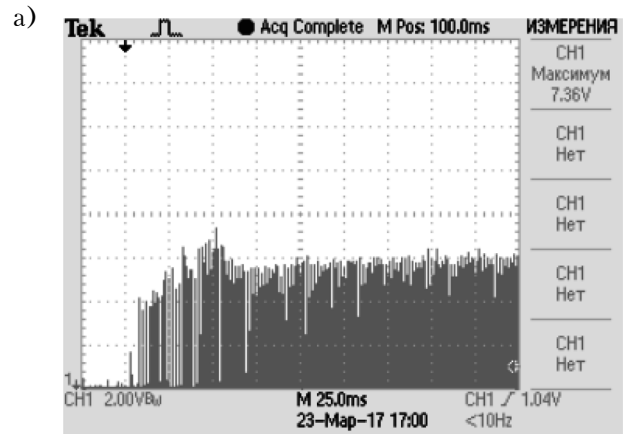


Рис. 11. Перехідний процес входного каскаду електрокоагулятора за наявності СПП (а) та у разі її відсутності, коли пуск керується програмно (б)

чаткової температури. У даному випадку необхідно враховувати залежність коефіцієнту заповнення імпульсів від температури. Для цього використовується мікропроцесор, до пам'яті якого вноситься електротеплова модель напівпровідникових приладів, що дозволяє з використанням знятих з датчиків даних розраховувати температуру кристалів транзистора і діода, струм дроселя, напругу навантаження і конденсатора (рис. 8). З мікропроцесора через функціональний перетворювач на систему плавного пуску подається сигнал, величина якого є обернено пропорційною до температури кристалів транзистора і діода $k=1/T^{\circ}$. Сигнал з СПП, а також сигнали, які є пропорційними напрузі навантаження та струму котушки індуктивності, подаються на систему керування (СК), яка генерує послідовність імпульсів керування силовим транзистором перетворювача зі змінним коефіцієнтом заповнення. Паралельно з цим відстежується напруга на навантаженні $u(R)$, і як тільки вона різко збільшується $dU/dt > 0$ (на-

приклад, при різкому зменшенні навантаження або знятті короткого замикання), СПП перезапускається з урахуванням поточної температури.

У разі застосування вказаного зворотного зв'язку маємо не лінійне зростання коефіцієнта заповнення імпульсів, а криву, яка обернено пропорційно пов'язана з температурою кристалу, скорегованою системою плавного пуску для правильного виведення перетворювача в неперервний режим роботи (рис. 9).

На рис. 10 продемонстровано, як розрізняються між собою перехідні процеси у разі використання стандартної та запропонованої систем плавного пуску за однакових параметрів нагрітого пристрою після короткого замикання.

З рис. 11 видно, що перехідний процес під час ввімкнення вхідного каскаду електрокоагулятора за наявності СПП має стрибок по струму, а отже і тепловий удар по кристалу напівпровідникового приладу, на відміну від роботи приладу за її відсутності, коли пуск регулюється програмно.

Розрахунковим шляхом були визначені параметри компонентів LC-фільтру та запропоновані доцільні типи магнітного матеріалу дроселя та ємності, які забезпечують величину стрибків струму транзисторів та, відповідно, теплових ударів по їх кристалах в допустимих межах.

Систему плавного пуску зі сталою часу, яка забезпечує аперіодичний тип перехідного процесу струму транзисторів регульованого інвертора напруги, було впроваджено в електрокоагуляторах «Надія-4», ЕХВЧ-300, 200, 120 та «Свармед», ЕК300М. Ефективність такого рішення була підтверджена наступним чином. Оцінювалась приведена у відсотках до об'єму середня за рік кількість відмов:

$$KB = \frac{N_{\text{відм}}}{N_{\text{сер}}} \cdot 100\%,$$

де $N_{\text{відм}}$ — середня за рік кількість відмов;
 $N_{\text{сер}}$ — кількість випущених за рік електрокоагуляторів.

Для електрокоагулятора ЕК300М1, який випускали у 2008—2016 роках, використовувалась силова частина з немодифікованими параметрами елементів. У файлі обліку ремонту цих коагуляторів серед зафіксованих відмов кількість пов'язаних з виходом з ладу силових транзисторів складає 17%. Для електрокоагуляторів «Надія-4» ЕХВЧ-300, 200, 120 та «Свармед» ЕК300М з модифікованою силовою частиною наведена кількість відмов складає 1,2%.

Заключення

Таким чином, проведений аналіз суміщених електротеплових процесів дозволив вирішити за-

дачу забезпечення теплового захисту напівпровідникових перетворювачів електроенергії за рахунок систем, дія яких базується на нормалізації параметрів згладжувального фільтра до температури, а для умов, коли вирогідним є виникнення коротких замикань, — на адаптації сталої часу системи плавного запуску до температури. Результати моделювання таких систем спільно з понижуючим широтно-імпульсним модулятором в об'єднаному середовищі PLECS-MATLAB-Simulink показали можливість суттєвого зменшення теплового удару по кристалу транзистора — від 210 до 85°C у першому випадку та від 180 до 80°C у другому, що підтверджує доцільність їх використання в реальних пристроях.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Fabis P.M., Shun D., Windischmann H. Thermal modelling of diamond-based power electronic spackage // Proc. 15th Annu. IEEE Semicond. Therm. Meas. Manage. Symp. — 1999. — P. 98—104.
2. Divins D. Using simulation to estimate MOSFET junction temperature in a circuit application // International Rectifier, Power Electronics Technology Exhibition & Conference. — Dallas, Texas. — 2007.
3. Malyna D. Accelerated synthesis of electrically and thermally constrained power electronic converter systems // Eindhoven, Eindhoven University Press. — 2007. — P. 229.
4. Drofenik U.A., Kolar J.W. General scheme for calculating switching-and conduction-losses of power semiconductors in numerical circuit simulations of power electronic systems // International Power Electronics Conference (IPEC'05). — 2005.
5. Drofenik U., Cotet D., Musing A. et al. Computationally efficient integration of complex thermal multi-chip power module models into circuit simulators // Power Conversion Conference (PCC'07). — 2007. — P. 550—557. — <http://dx.doi.org/10.1109/pcccon.2007.373020>
6. Merrih A. A. Compact thermal modeling methodology for predicting skin temperature of passively cooled devices // Applied Thermal Engineering. — Vol. 85. — 2015. — P. 287—296.
7. Тонкаль В. Е., Руденко В. С., Жуйков В. Я. и др. Вентильные преобразователи переменной структуры. — Киев: Наук. думка, 1989.
8. Стжелецьки Р., Коротеев И. Е., Жуйков В. Я. Хаотические процессы в системах силовой электроники. — Киев: Аверс, 2001.
9. Kron G. Diakoptics, the piecewise solution of large scale systems. — London: MacDonald & Co, 1963.
10. Soft Ferrites. Data Handbook MA01, Philips Components. — Netherlands: Philips Electronics, 1996.
11. Филаретов В. В. Теорема Сигорского об определителе суммы матриц и диакоптика // Электроника и связь. — 2010. — № 2. — С. 5—13.
12. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления. — Москва: Мир, 1999.
13. Simulation software PLECS. Plexim GmbH. [Online]. <http://www.plexim.com>.
14. Register A. A. Guide to MATLAB object-oriented programming. — Florida: SciTech Publishing Inc., 2007.

*Дата надходження рукопису
до редакції 12.05 2017 г.*

АДАПТИВНАЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Предложены системы тепловой защиты импульсных полупроводниковых преобразователей электроэнергии. Показано, что в полупроводниковых преобразователях с выходным сглаживающим фильтром целесообразно использовать схемотехнические средства тепловой защиты, действие которых основано на нормализации параметров сглаживающего фильтра к температуре, а для случаев, когда возможны короткие замыкания, — на адаптации постоянной времени системы плавного запуска к изменению температуры. Результаты моделирования совмещенных электромагнитных и тепловых процессов в широтно-импульсном преобразователе понижающего типа с предложенными системами тепловой защиты в объединенной среде PLECS-MATLAB-Simulink показали возможность существенного уменьшения теплового удара по кристаллу транзистора. Результаты подтверждены испытаниями на реальных устройствах.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, состояние системы, электротепловая модель, переходные процессы, источник питания.

DOI: 10.15222/TKEA2017.3.03
UDC 621.314

R. A. BARANIUK, V. A. TODORENKO, O. F. BONDARENKO

Ukraine, NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
E-mail: licornedev@gmail.com, va.todorenko@gmail.com, bondarenkoaf@gmail.com

ADAPTIVE ELECTROTHERMAL PROTECTION OF POWER CONVERTERS

Thermal management for power converters during normal operation and transient modes when electrical components are warmed up is an actual problem. This can be particularly important for converters with intermittent duty operation, e.g. power supplies for resistance welding. According to some research, nearly 60% of failures are temperature-induced, and for every 10°C temperature rise in operating environment the failure rate nearly doubles.

In this paper, thermal motion of state equations eigenvalue is analysed. It is shown, that in semiconductor converters with an output smoothing filter it is appropriate to use thermal protection devices based on thermal normalisation of the converter filter and, while for cases when short circuits are possible it is appropriate to use a soft start system with thermal adaptation for soft start time factor.

Based on these results, two systems of thermal protections operating for semiconductor power converters are introduced. Simulation of combined electromagnetic and thermal processes in buck converter operating with both thermal management systems in overlapping environments MATLAB/Simulink and PLECS showed the possibility to significantly reduce thermal shock on semiconductor components. Using the system of filter parameters normalisation decreases the temperature of the crystal from 210°C to 85°C, using the adaptive soft start system decreases the temperature from 180°C to 80°C. The simulation results are confirmed by tests on real devices.

Keywords: differential equations, system state, electrothermal model, transient processes, power supply.

REFERENCES

1. Fabis P.M., Shun D., Windischmann H. Thermal modelling of diamond-based power electronics package. *Proc. 15th Annu. IEEE Semicond. Therm. Meas. Manage. Symp.*, 1999, pp. 98-104.
2. Divins D. Using Simulation to Estimate MOSFET junction temperature in a circuit application. *International Rectifier, Power Electronics Technology Exhibition & Conference*, Dallas, Texas, 2007.
3. Malyna D. *Accelerated synthesis of electrically and thermally constrained power electronic converter systems*. Eindhoven, Eindhoven University Press., 2007, 229 p.
4. Drofenik U. A., Kolar J. W. A general scheme for calculating switching-and conduction-losses of power semiconductors in numerical circuit simulations of power electronic systems. *International Power Electronics Conference (IPEC'05)*, 2005, pp. 4-8.
5. Drofenik U., Cotet D., Musing A., Meyer J. M., Kolar J. W. Computationally efficient integration of complex thermal multi-chip power module models into circuit simulators. *Power Conversion Conference*, 2007, Nagoya, pp. 550-557. <http://dx.doi.org/10.1109/pccn.2007.373020>
6. Merrikh A. A. Compact thermal modeling methodology for predicting skin temperature of passively cooled devices. *Applied Thermal Engineering*, vol. 85, 2015, pp. 287-296.
7. Tonkal' V.T., Rudenko V.S., Zhuikov V.Ya. et al. *Ventil'nye preobrazovateli peremennoi struktury* [Variable-type gate converters]. Kyiv, Naukova dumka, 1989, 336 p. (Rus)
8. Stzheletski R., Koroteev I.E., Zhuikov V.Ya. *Khaoticheskie protsessy v sistemakh silovoi elektroniki* [Chaotic processes in power electronics systems]. Kyiv, Avers, 2001. (Rus)
9. Kron G. *Diakoptics, the piecewise solution of large scale systems*. London, MacDonald & Co, 1963.
10. *Soft Ferrites. Data Handbook* MA01, Philips Components. Netherlands, Philips Electronics, 1996, 887p.
11. Filaretov V.V. [Sigorsky's theorem on the determinant of the sum of matrices and diakoptics]. *Electronics and Communications*, 2010, no. 2, pp. 5-13. (Rus)
12. Golub D., Van Loun Ch. *Matrichnyye vychisleniya* [Matrix computing]. Moscow. Mir, 1999, 458 p. (Rus)
13. *Simulation software PLECS. Plexim GmbH*. [Online]. <http://www.plexim.com>.
14. Register A. A. *Guide to MATLAB object-oriented programming*. Florida: SciTech Publishing Inc., 2007, p. 354.

К. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО

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

E-mail: gen-nto@ukr.net

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЧ-ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ ДЛЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Проведен анализ особенностей микрополосковых дискретных отражательных фазовращателей. Изложен принцип формирования многоразрядных фазовращателей на основе проходных. Приведены схемы их реализации.

Ключевые слова: СВЧ, фазовращатель, микрополосковая линия, дискрет, диод, согласующие цепи, направленный ответвитель, схема.

Все современные радиолокационные системы СВЧ-диапазона (обнаружения, нацеливания, наблюдения и контроля) создаются на основе активных фазированных антенных решеток, определяющим элементом которых являются многоразрядные фазовращатели (**ФВ**). С помощью ФВ формируется и управляется антенный луч как в режиме излучения (передачи сигнала), так и в режиме приема (обработки информации). Следует отметить, что для систем ближнего действия (до 5 км) для организации антенных решеток можно применять полупроводниковые микросхемы многоразрядных ФВ, например AD8341, AD8349, AMT2221013OP или CGY2177AUN (Digital Phase Shifter), которые способны обеспечить работоспособность системы при непрерывной СВЧ-мощности до 1 Вт. В случае же систем дальнего действия (более 30 км), где необходима непрерывная СВЧ-мощность более 5–10 Вт на единичный модуль решетки, применение этих микросхем невозможно.

Рассмотрим процесс реализации многоразрядных фазовращателей различного типа.

Известно [1], что многоразрядный (многодискретный) ФВ с числом разрядов (дискретов) p на основе микрополосковой линии (МПЛ)

представляет собой последовательное соединение ряда проходных ФВ с разными дискретными значениями фазового сдвига $\Delta\varphi$, которые определяются выражением

$$\Delta\varphi_i = 2\pi/2^i, \text{ где } i = 1, \dots, p \quad (1)$$

Например, для $p = 4$ имеем $\Delta\varphi_1 = 180^\circ$, $\Delta\varphi_2 = 90^\circ$, $\Delta\varphi_3 = 45^\circ$ и $\Delta\varphi_4 = 22,5^\circ$.

Из [2, с. 110, 111] следует, что в проходном дискретном ФВ фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ обеспечивается за счет происходящего под влиянием управляющего (коммутирующего) сигнала изменения электрической длины отрезка МПЛ с подключенным к нему варактором, сегнетоэлектриком или другим элементом с управляемой проводимостью. Этот процесс можно проиллюстрировать на примере структурной схемы проходного ФВ, которая приведена на **рис. 1**. Здесь видно, что фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ такого устройства определяется диодной секцией и длиной отрезка МПЛ, электрическая длина l_φ которого зависит от числа дискретов. Собственно диодная секция состоит из элемента с дискретно изменяемой проводимостью (в качестве такового сейчас чаще всего применяется переключательный $p-i-n$ -диод) и элементов, обеспечивающих его короткое замы-

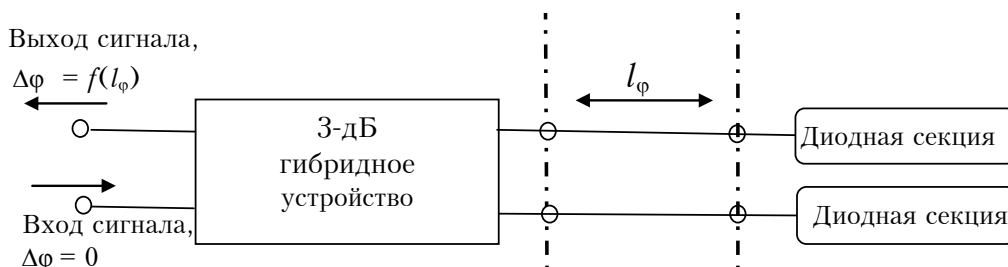


Рис. 1. Структурная схема проходного фазовращателя [3, с. 155]

кание по СВЧ, а также фильтра нижних частот (ФНЧ) для подачи коммутирующего (управляющего фазой) сигнала. Структуру, объединяющую фазосдвигающий отрезок МПЛ и диодную секцию, принято называть дискретным отражательным фазовращателем (ДОФ) [3].

Таким образом, для проектирования много-разрядного (многодискретного) микрополоскового фазовращателя необходимо сформировать базовую схему дискретного отражательного ФВ и проанализировать ее особенности; рассмотреть варианты построения схем проходных дискретных ФВ и оценить их достоинства и недостатки; выбрать и обосновать целесообразность реализации схем многоразрядных ФВ. Целью настоящей работы является рассмотрение указанных вопросов.

Дискретные отражательные фазовращатели

ДОФ является основным (базовым) элементом микрополосковых многоразрядных ФВ и представляет собой двухполюсник, в котором воздействие коммутирующего сигнала приводит к изменению фазы отраженного сигнала. При этом ДОФ имеет только два рабочих состояния — при открытом или закрытом $p-i-n$ -диоде.

Соответственно, за счет изменения электрической длины МПЛ в ДОФ имеет место скачкообразное изменение фазы проходящей или отраженной электромагнитной СВЧ-волны. Это является следствием эквивалентного изменения электрической длины короткозамкнутой МПЛ при переходе от открытого состояния $p-i-n$ -диода к закрытому. Следовательно, на выходе ДОФ СВЧ-сигнал будет уже фазоманипулированным.

С учетом изложенного базовая электрическая схема ДОФ на основе МПЛ может быть представлена в виде, приведенном на рис. 2. Здесь ρ_0 соответствует нормированной волновой проводимости отрезка МПЛ с импедансом $Z_0 = 50$ Ом; ρ_1 , ρ_2 — отрезков высокоомной ($Z \approx 100$ Ом) и низкоомной ($Z \approx 20$ Ом) МПЛ. Следует отметить, что фазовый сдвиг конкретного ДОФ определяется электрической длиной l_ϕ отрезка регулярной МПЛ в относительных значениях длины волны λ . При этом длина фазосдвигающе-

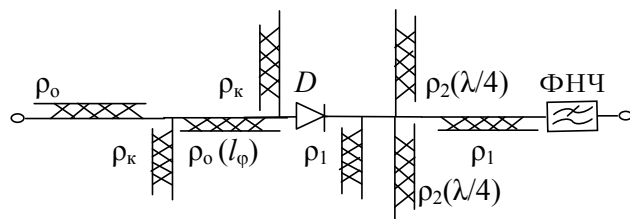


Рис. 2. Базовая электрическая схема микрополоскового ДОФ

го отрезка МПЛ соответствует заданному дискретному фазовому сдвигу. Для его согласования с СВЧ-трактом в МПЛ включены корректирующие отрезки с волновой проводимостью ρ_k , которая зависит от конкретного дискрета фазы.

Диодная секция состоит из переключающего $p-i-n$ -диола D , двух высокоомных шлейфов с импедансом ρ_1 для компенсации паразитных параметров диода, двух четвертьволновых низкоомных шлейфов с импедансом ρ_2 , являющихся короткозамыкателем по СВЧ, а также цепи управления режимом диода в виде высокоомной МПЛ с импедансом ρ_1 и подключенным к ней Г- или Т-образным фильтром нижних частот.

Поскольку СВЧ-сигнал в ДОФ проходит через фазосдвигающий отрезок МПЛ дважды (входной и отраженный), реальное значение электрической длины l_ϕ таких отрезков для случая четырехразрядного ФВ будет следующим: $l_1 = \lambda/4$ для $\Delta\phi_1 = 180^\circ$; $l_2 = \lambda/8$ для $\Delta\phi_2 = 90^\circ$; $l_3 = \lambda/16$ для $\Delta\phi_3 = 45^\circ$; $l_4 = \lambda/32$ для $\Delta\phi_4 = 22,5^\circ$.

Следует отметить, что для расчета конкретных топологических (геометрических) размеров отрезков МПЛ, образующих ДОФ, следует использовать известные и неоднократно апробированные соотношения, приведенные, например, в [4].

Переключающий $p-i-n$ -диод в ДОФ используется для фазовой манипуляции СВЧ-сигнала, которая определяется режимом коммутации подключаемых отрезков МПЛ с различной электрической длиной. Принцип действия переключающего диода основан на резком изменении полярности управляющего сигнала, причем скорость коммутации фазового состояния ДОФ и допустимая непрерывная мощность определяются именно параметрами $p-i-n$ -диола — быстродействием и его полупроводниковой структурой.

Переключающий $p-i-n$ -диод в ДОФ включается в МПЛ либо по прямой схеме, либо по инверсной. В первом случае прямому смещению соответствует состояние запирающего, а обратному — состояние пропускающего. Эквивалентная схема такого диода приведена на рис. 3.

Максимальная непрерывная мощность СВЧ-сигнала, коммутируемого $p-i-n$ -диодом, определяется двумя условиями: рассеиваемая (поглощенная) мощность не должна превышать максимально допустимую, а сумма амплитуд напряжения управляющего сигнала и обратного смещения не должна превышать пробивное (максимально допустимое) напряжение. Более полная информация о переключающем $p-i-n$ -диоде содержится в специализированных источниках, например в [5].

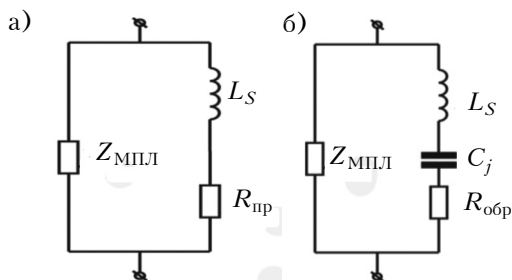


Рис. 3. Эквивалентная схема переключающего $p-i-n$ -диода при положительном (а) и отрицательном (б) электрическом смещении:

$Z_{МПЛ}$ — импеданс микрополосковой структуры, подведенной к диоду; L_S — индуктивность выводов и монтажа; C_j — емкость диодной структуры; $R_{пр}$ — сопротивление потерь при прямом смещении; $R_{обр}$ — сопротивление потерь при обратном смещении

Если фактические значения активного сопротивления $p-i-n$ -диода и активной составляющей его импеданса $Z_{МПЛ}$ минимальны, то можно предположить, что они не влияют на фазовые состояния ДОФ. Тогда реальный режим возбуждения ДОФ будет соответствовать согласованному по входу режиму и полной передаче мощности уже фазоманипулированного СВЧ-сигнала на его выходе. Для оптимизации структуры ДОФ относительно обоих состояний $p-i-n$ -диода можно использовать традиционный метод элементов матриц рассеяния или такие современные САПР, как Microwave Office или HFSS.

ДОФ, как было отмечено ранее, является базовым элементом микрополосковых многоразрядных ФВ, но даже из ряда отдельных ДОФ с различным фазовым сдвигом $\Delta\varphi_i$ сформировать многоразрядный фазовращатель невозможно, поскольку все такие ДОФ являются двухполюсниками. Для названной цели необходимы четырехполюсники — дискретные проходные отражательные ФВ (ДПОФ).

Дискретные проходные отражательные фазовращатели

Микрополосковые ДПОФ могут быть двух типов — циркуляторные или балансные [2]. Циркуляторные ДПОФ представляют собой устройство, в котором ДОФ подключен к одному из свободных полюсов циркулятора Х- или Y-типа. Например, в случае Y-циркулятора немодулированный СВЧ-сигнал с входного полюса циркулятора подается в соответствии с его структурой (по стрелке на рис. 4) на вход ДОФ.

При открытом $p-i-n$ -диоде СВЧ-сигнал доходит до короткозамыкателя, отражается от него и проходит на выход ДОФ, откуда уже фазоманипулированный сигнал подается (также по стрелке) на выходной полюс циркулятора.

Преимуществом ДПОФ циркуляторного типа является то, что коммутация его фазового состояния осуществляется только одним $p-i-n$ -диодом. Однако устройства такого типа недостаточно широкополосны вследствие зависимости от рабочей полосы частот микрополосковых циркуляторов. Кроме того, для функционирования последних необходима достаточно громоздкая арматура магнитной системы, что исключает возможность их интегральной (планарной) компоновки (реализации). Именно эти факторы предопределили ограниченную востребованность ДПОФ такого типа.

Балансные ДПОФ — это четырехполюсники, образованные на основе восьмиполюсников — гибридных устройств (ГУ), обеспечивающих уровень переходного затухания 3 дБ [2, с. 126–128]. В таких устройствах (рис. 5) мощность СВЧ-сигнала делится поровну между прямым и рабочим полюсами ДПОФ, к которым подключены одинаковые ДОФ.

Немодулированный СВЧ-сигнал на входе ДПОФ (полюс 1) делится поровну по амплитуде между полюсами 3 и 4 и передается на входы

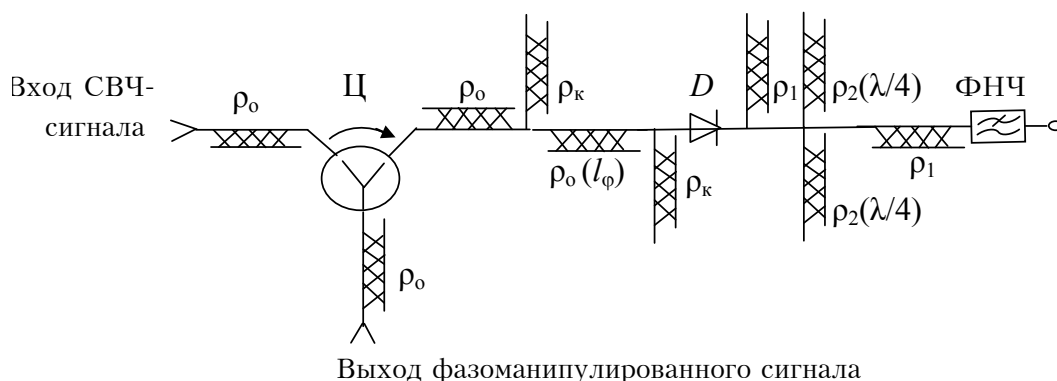


Рис. 4. Электрическая схема проходного фазовращателя циркуляторного типа

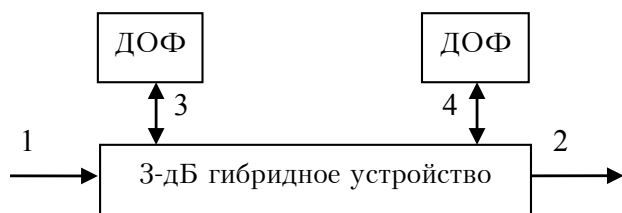


Рис. 5. Структурная схема проходного фазовращателя балансного типа

ДОФ. Поскольку оба ДОФ одинаковы, то уже фазоманипулированные равноамплитудные сигналы с выходов ДОФ (полюсы 3 и 4 ДПОФ), векторно суммируясь (по фазе и амплитуде), поступают на выход ДПОФ (полюс 2). Следовательно, фазовый сдвиг одноразрядного ДПОФ на ГУ будет фактически равен фазовому сдвигу, создаваемому его единичными ДОФ.

Оптимальный режим функционирования ДПОФ определяется уровнем согласования при условии равенства потерь и постоянства фазового сдвига в полосе частот для двух фазовых состояний ДОФ. Соответственно, при выборе ГУ-восьмиполосников желательно, чтобы они имели как можно большую ширину полосы пропускания Δf и минимальные габариты. В качестве восьмиполосников (ГУ с переходным ослаблением 3 дБ) в ДПОФ могут применяться шлейфные мосты, гибридные кольца и направленные ответвители на связанных МПЛ, например типа «тандем» или Lange. Из них указанным критериям соответствует только ответвитель с многостыревой структурой Lange [7] (рис. 6), обладающий максимальной из перечисленных ответвителей шириной полосы пропускания ($\Delta f \geq 50\%$) при хорошем согласовании с регулярным трактом (КСВН не более 1,15), а также малыми габаритами (площадью) — например, на подложке из поликора толщиной 1 мм такой ответвитель имеет размеры не более $0,8 \text{ мм} \times \lambda/4$. Остальные из перечисленных ответвителей достаточно габаритны (поскольку

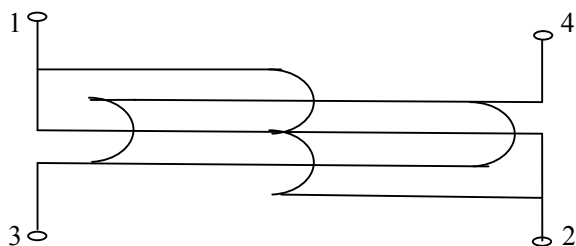


Рис. 6. Структурная схема ответвителя типа Lange

компонуются в двух координатах из отрезков МПЛ длиной $\lambda/4$), а шлейфные мосты и гибридные кольца еще и узкополосны ($\Delta f \leq 15\%$).

Основными требованиями при выборе типа проходного фазовращателя являются следующие: собственные потери (определяются параметрами МПЛ), быстродействие (определяется характеристиками переключающего диода), допустимая мощность и надежность.

Все СВЧ-устройства балансного типа обладают повышенной устойчивостью (надежностью) их электрических параметров. Именно поэтому ДПОФ балансного типа с ответвителем Lange имеют существенное преимущество перед ДПОФ циркуляторного типа.

Еще одно преимущество ДПОФ балансного типа определяется его структурной схемой (рис. 2). Мощность входного СВЧ-сигнала делится поровну между полюсами 3 и 4 ответвителя Lange. Соответственно, на каждый ДОФ, а значит, и на его переключающий диод подается в два раза меньшая мощность СВЧ-сигнала, чем в ДПОФ циркуляторного типа.

Многоразрядные дискретные фазовращатели

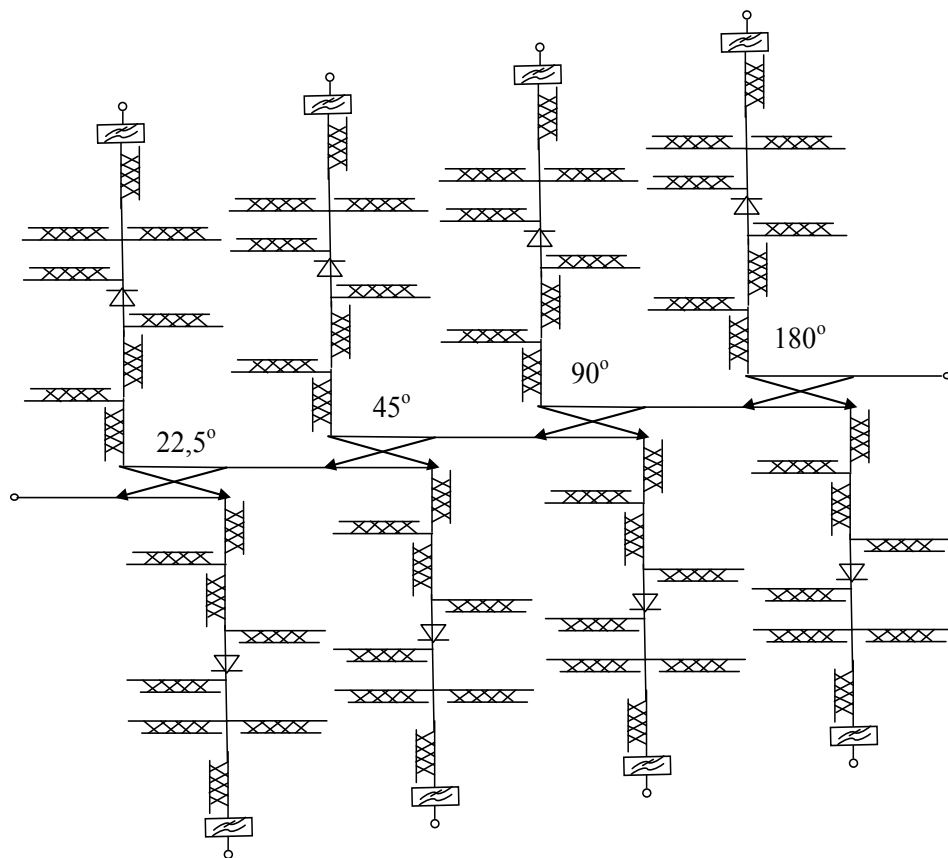
Как отмечено выше, многоразрядные микрополосковые дискретные ФВ (МДФВ) образуются путем последовательного соединения ДПОФ с различным фазовым сдвигом. Следует отметить, что в качестве самостоятельных устройств МДФВ применяются достаточно редко. В большинстве известных случаев микрополосковые МДФВ используются в качестве элементов приемопередающих модулей антенных решеток, для удобства компоновки которых входы и выходы МДФВ должны быть расположены на продольной оси (по центру) модуля. Именно это условие создает определенные проблемы при реальном проектировании МДФВ.

Как было показано выше, ДПОФ балансного типа организуются на базе направленного ответвителя с многостыревой структурой типа Lange. Далее рассмотрим два возможных варианта формирования структурной схемы многоразрядных МДФВ.

Очевидно, что с целью минимизации потерь четырехразрядного ФВ все образующие его ДПОФ должны быть соединены между собой непосредственно. На практике это означает, что выход ответвителя каждого предыдущего ДПОФ непосредственно соединен со входом последующего.

Реальная длина ответвителя типа Lange равна четверти длины волны: $l_{\text{НО}} = \lambda/4$. В то же время в каждом ДОФ низкоомные шлейфные

a)



б)

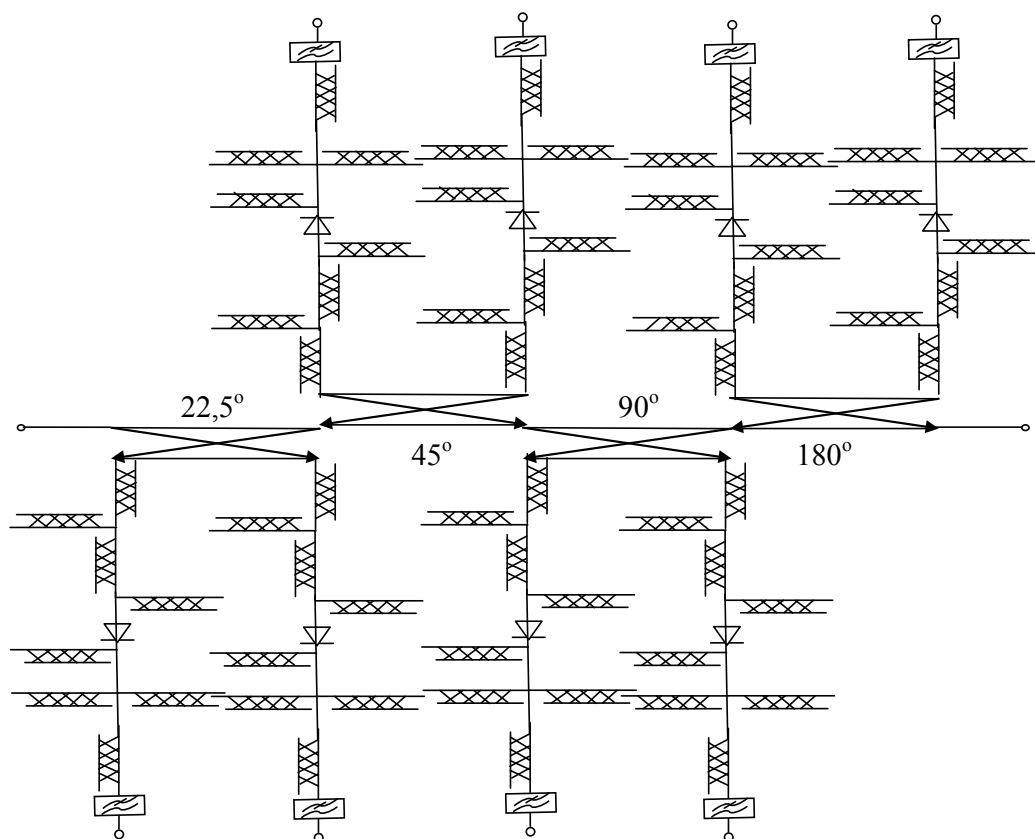


Рис. 7. Структурная схема четырехразрядного ФВ с модифицированным (а) и с классическим (б) направленными ответвителями

короткозамыкатели и распределенные емкости фильтров нижних частот, служащих для подачи коммутирующих сигналов на $p-i-n$ -диоды, тоже имеют четвертьволновую длину, т. е. достаточно габаритны. Именно поэтому разместить рядом ДОФ двух соседних ДПОФ невозможно.

Первый вариант реализации схемы много-разрядных МДФВ был предложен в 1979 г. сотрудниками ленинградского ПО «Светлана» [8]. Здесь указанная проблема решена за счет применения для образования микрополоскового четырехразрядного ФВ не классического ответвителя Lange, а его модифицированного варианта. При этом полюсы ответвителя, между которыми входной сигнал делится поровну и которые нагружены ДОФ, располагаются по разным сторонам продольной оси ответвителя.

Структура схема такой реализации четырехразрядного МДФВ приведена на **рис. 7, а**. С целью максимального снижения потерь все модифицированные ответвители Lange соединены между собой практически непосредственно. При этом, однако, ответвитель Lange не соответствует классическим условиям деления энергии электромагнитной волны пополам, что ведет к увеличению потерь многоразрядного ФВ. Устранить этот недостаток можно только путем изменения электромагнитной связи в структуре ответвителя. Это требует дополнительного уточнения (перерасчета) параметров для каждого дискрета ДПОФ, а поскольку все ДПОФ в этой схеме не соответствуют балансному типу, их топологию необходимо повторно оптимизировать с помощью САПР.

Второй вариант реализации микрополоскового четырехразрядного ФВ на основе ДПОФ балансного типа с классическим ответвителем типа Lange приведен на **рис. 7, б**. Здесь все четыре ДПОФ — балансного типа, а соседние ДПОФ расположены по разные стороны относительно оси ФВ. При этом ответвители Lange отдельных ДПОФ также соединены между собой практически непосредственно, что минимизирует потери ФВ. Соответственно, все четыре ДПОФ и образованный ими четырехразрядный ФВ не требуют повторной оптимизации топологий и при этом, как и любые балансные устройства, они будут устойчивы с точки зрения электрических параметров.

Заключение

Рассмотренные принципы создания микрополосковых дискретных ФВ отражательного типа, дискретных проходных ФВ балансного типа и

обоих описанных вариантов четырехразрядных ФВ неоднократно проходили апробацию, которая экспериментально подтвердила их работоспособность. Все упомянутые устройства были реализованы как на керамических подложках из поликора или керамики 22ХС, так и на подложках из органо-диэлектриков типа Duroid.

Такие параметры многоразрядных фазовращателей, как время переключения фазового сдвига, импульсная и средняя управляемая СВЧ-мощность, а также допустимая длительность импульса, определяются структурой $p-i-n$ -диола. Собственно микрополосковое решение схемы четырехразрядных ФВ, сформированных в соответствии в описанной методикой, позволяет для частот до 4,2 ГГц и полосы рабочих частот до 20% достичь следующих параметров: точность установки фазового сдвига $\pm 4 \dots \pm 10^\circ$ (в зависимости от значения дискрета); максимальные вносимые потери не хуже 1,8 дБ; перепад вносимых потерь в полосе рабочих частот не более 0,5 дБ; КСВН не более 1,8 при токе управления через диод не более 100 мА. При этом указанный частотный диапазон не является предельно достижимым и описанную методику можно с полной уверенностью рекомендовать для проектирования многоразрядных микрополосковых фазовращателей до частот не менее 12 ГГц.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хижа Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. СВЧ фазовращатели и переключатели. — Москва: Радио и связь, 1984.
2. Бова Н.Т., Стукало П.А., Храмов В.А. Управляющие устройства СВЧ. — Киев: Техніка, 1973.
3. Бова Н.Т., Ефремов Ю.Г., Конин В.В. и др. Микроэлектронные устройства СВЧ. — Киев: Техніка, 1984.
4. Собол Г. СВЧ применения технологии интегральных схем // В кн.: Полупроводниковые приборы СВЧ / Под ред. Ф.Брэнда. — Москва: Мир, 1972. — С. 83–96.
5. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Справочник / Под ред. Наливайко Б.А. — Томск: МГП «РАСКО», 1992.
6. Вендик И.Б., Хижа Г.С., Чебоксаров С.И. Дискретные фазовращатели проходного типа на $p-i-n$ -диолах // Известия ЛЭТИ. — 1972. — Вып. 101. — С. 27–33.
7. Lange J. Interdigitated stripline quadrature hybrid // IEEE Trans. MTT. — 1969. — Vol.17, N 12. — P. 1150–1151.
8. Хижа Г.С., Кузнецов В.И., Сулоева О.А. Мощные интегральные СВЧ-модули, фазовращатели на диодах для фазированных антенных решеток // Специальная техника средств связи, сер. ТРС. — 1979. — Вып. 2. — С. 71–77.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 12.04 2017 г.*

ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ НВЧ-ФАЗООБЕРТАЧІВ ДЛЯ АНТЕННИХ ГРАТОК

Проведено аналіз особливостей мікросмужкових дискретних відбивних фазообертачів. Викладено принцип формування багаторозрядних фазообертачів на основі прохідних. Наведено схеми їх реалізації.

Ключові слова: НВЧ, фазообертач, мікросмужкова лінія, дискрет, діод, узгоджувальні кола, спрямований відгалужувач, схема.

DOI: 10.15222/TKEA2017.3.12

E. N. GLUSHECHENKO

UDC 621.372.852:621.382

Ukraine, Kyiv, Scientific-production enterprise «Saturn»

E-mail: gen-nto@ukr.net

DESIGN OF MICROSTRIP MICROWAVE PHASE SHIFTERS FOR ANTENNA ARRAYS

The analysis of the features of microstrip discrete reflective phase shifters is given. The principle of forming multi-bit phase shifters based on the transmission-type phase shifter is presented. Two specific schemes are given as the implementation of the phase shifters.

Keywords: microwave, phase shifter, microstrip, discrete, diode, coupler, matching circuits, scheme.

REFERENCES

1. Khizha G.S., Vendik I.B., Serebryakova E.A. *SVCh fazovrashchateli i pereklyuchateli* [Microwave phase shifters and switches]. Moscow, Radio i svyaz', 1984. (Rus)
2. Bova N.T., Stukalo P.A., Khramov V.A. *Upravlyayushchie ustroystva SVCh* [Microwave control devices]. Kiev, Tekhnika, 1973. (Rus)
3. Bova N.T., Efremov Yu.G., Konin V.V. et al. *Mikroelektronnye ustroystva SVCh*. [Microelectronic microwave devices]. Kiev, Tekhnika, 1984. (Rus)
4. Sobol G. [Microwave applications of integrated circuit technology]. In book: *Poluprovodnikovye pribory SVCh*, Ed. by F.Brenda, Moscow, Mir, 1972, pp. 83-96. (Rus)
5. Poluprovodnikovye pribory. *Sverkhvysokochastotnye diody. Spravochnik* [Semiconductor devices. Ultrahigh-frequency diodes. Handbook]. Ed. by B.A.Nalivaiko, Tomsk, MGP «RASKO», 1992. (Rus)
6. Vendik I.B., Khizha G.S., Cheboksarov S.I. [Discrete phase shifters of a through type on *p-i-n*-diodes]. *Izvestiya LETI*, 1972, iss. 101, pp. 27-33. (Rus)
7. Lange J. Interdigitated stripline quadrature hybrid. *IEEE Trans. MTT*, 1969, vol. 17, no. 12, pp. 1150-1151.
8. Khizha G.S., Kuznetsov V.I., Suloeva O.A. [Powerful integrated microwave modules, phase shifters on diodes for phased antenna arrays]. *Spetsial'naya tekhnika sredstv svyazi, ser. TRS*, 1979, iss. 2, pp. 71–77. (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Горбатий І. В., Бондарев А. П. Телекомунікаційні системи та мережі.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016.

Автори прагнули ознайомити читача з новими технічними рішеннями в галузі телекомунікацій, сучасними технологіями передавання даних та мовних сигналів. Розглянуто принципи функціонування, технології та протоколи сучасних телекомунікаційних систем та мереж. Описано принципи функціонування й вимоги до телекомунікаційних систем та мереж наступних поколінь. Детально розглянуто методи формування й оброблення сигналів у телекомунікаційних системах та мережах. Описано методи обчислення частотних та енергетичних характеристик модульованих і кодованих сигналів.

Також у посібнику наведено матеріали, присвячені найважливішим показникам телекомунікаційних систем та мереж — якості та технічній ефективності. Особливу увагу присвячено розгляду питань надійності, достовірності та безпеки телекомунікаційних систем та мереж.

Для студентів вищих навчальних закладів спеціальностей «Телекомунікаційні системи та мережі», «Телекомунікації та радіотехніка» та споріднених спеціальностей, а також для тих, хто цікавиться телекомунікаційними й радіотехнічними технологіями.



К. т. н. И. В. ЦЕВУХ, А. Н. ШЕЙК-СЕЙКИН,
к. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНИРЕНКО, Ю. А. САВЧУК*

Украина, Одесский национальный политехнический университет;
г. Одесса, *НИИ «Шторм»

E-mail: ans@irt.opu.ua

ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ДЛЯ ИНДИКАТОРА КРУГОВОГО ОБЗОРА «ПИКЕТ»

Разработано устройство имитации сигнально-помеховой обстановки для радиолокационных станций (РЛС), оснащенных индикатором кругового обзора «Пикет», которое не требует для своей работы наличия персональной ЭВМ. Благодаря применению оригинального способа формирования отметок от целей удалось существенно снизить объем памяти, требуемой для хранения информации о сценарии, достоверно имитирующем работу РЛС в реальных условиях. Устройство обеспечивает одновременную работу двенадцати индикаторов кругового обзора и предназначено для оснащения учебных центров по подготовке операторов контроля воздушной обстановки.

Ключевые слова: имитатор сигналов, индикатор кругового обзора, РЛС, оператор контроля воздушной обстановки.

В настоящее время для обучения операторов контроля воздушной обстановки широко используются различные имитаторы сигнально-помеховой обстановки, подключаемые к соответствующим индикаторам радиолокационных станций (РЛС) и не требующие включения остальной аппаратуры самих РЛС, в частности передатчиков. К такому классу устройств относится комплексная система сопряжения РЛС, ПЭВМ и индикатора кругового обзора (ИКО) «Пикет», обеспечивающая запись информации с выхода аналоговых РЛС типа П-18, П-37, 5Н84А в память ПЭВМ с последующим ее воспроизведением и отображением на экране ИКО [1]. Центральным элементом системы является ПЭВМ, обеспечивающая управление адаптерами сопряжения с ИКО и РЛС, хранение данных, отображение информации на мониторе и т. д.

Очевидно, что наличие в составе устройства ПЭВМ делает его достаточно дорогостоящим, а его применение сопряжено с проблемами, связанными с использованием операционной систе-

мы. Кроме того, указанная выше комплексная система является не имитатором, а устройством записи и воспроизведения реальной воздушной обстановки, благодаря чему она используется, в том числе, и как средство обучения операторов. Однако для обучения операторов на начальном этапе, в полевых условиях, а также для контроля работоспособности ИКО такая система является избыточной, громоздкой и ненадежной, т. е. ее применение нельзя считать целесообразным. Поэтому задача разработки компактного, надежного и недорогого имитатора остается в настоящее время весьма актуальной [2, 3].

В настоящей работе описан разработанный специалистами ОНПУ и НИИ «Шторм» имитатор сигнально-помеховой обстановки для ИКО «Пикет», не требующий для своей работы наличия ПЭВМ и обеспечивающий достоверную имитацию работы РЛС в реальных условиях.

Структурная схема устройства имитации сигналов (УИС) приведена на рис. 1. В его состав

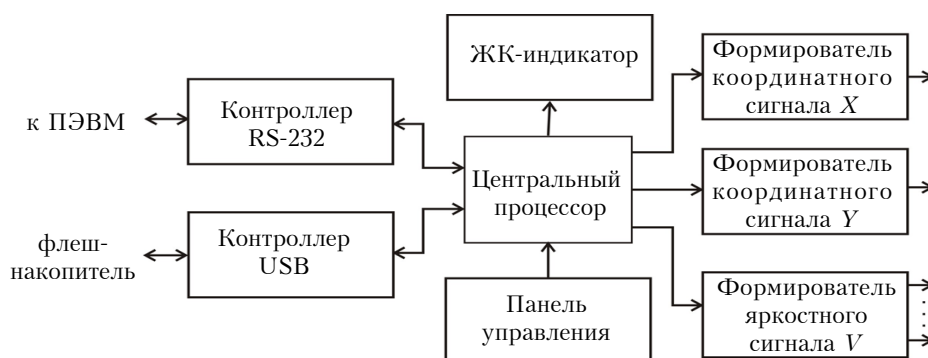


Рис. 1. Структурная схема устройства имитации сигналов

входят: центральный процессор (ЦП), обеспечивающий выполнение программы и формирование всех цифровых управляющих и информационных сигналов; формирователи аналоговых координатных сигналов X и Y ; формирователь дискретных яркостных сигналов V ; контроллер USB-порта, обеспечивающий подключение к ЦП внешнего флэш-накопителя; контроллер RS-232 для подключения ПЭВМ (при необходимости); ЖК-индикатор, отображающий процесс управления прибором и параметры выбранного режима работы УИС; панель управления работой УИС.

Центральный процессор реализован на базе 32-разрядного микроконтроллера STM32F407 с тактовой частотой 168 МГц и развитой периферией.

ЖК-индикатор WH2004/V формирует 4 строки по 20 символов в каждой и обеспечивает вывод достаточно подробной информации о состоянии устройства.

Устройство формирует несколько видов сигналов: круговой развертки X , Y (с периодом 6–20 с), сигналы от целей $V1$ (7 типов), визиры по дальности (с шагом 10 и 50 км) и по азимуту (с шагом 10 и 30°) $V2...V5$, шумовой сигнал $V6$.

Формирователи координатных сигналов X , Y реализованы в виде цифроаналоговых преобразователей, использующих 12-разрядные ЦАП DAC8412 и формирующих 24-разрядные сигналы развертки, которые после преобразования в аналоговый вид обеспечивают очень высокое качество сигналов, в т. ч. высокую линейность радиальной развертки для любого положения луча (значения азимута).

Формирователь яркостных сигналов V имеет 8 каналов, обеспечивающих подачу на ИКО отметок от целей, визиры по дальности и азимуту, шум и помех. Он обладает высокой нагрузочной способностью, позволяющей подключать к выходу несколько ИКО.

На рис. 2 приведены формы сигналов от целей со следующими угловыми размерами по азимуту: отметка от цели — 10°; отметка опознавания — 8° (их можно оперативно изменять (уменьшать) на величину от 1 до 5°).

Шумовой сигнал $V6$ обеспечивает равномерную точечную засветку всей площади экрана га-

уссовым шумом, а также имитацию отражения от подстилающей поверхности в 10–20-километровой зоне расположения антенны.

Главная особенность разработанного прибора состоит в формировании отметок от целей фрактальным методом, который заключается в том, что координаты центра тяжести цели (дальность, азимут цели) используются для формирования координат ее модели, заданной параметром «тип цели». Это позволяет существенно снизить объем памяти, требуемой для хранения информации о сценарии.

На рис. 3 приведен пример графического изображения фрактала цели типа 2, а в таблице — соответствующий ему массив данных, хранящийся в памяти ЦП (B_i , D_i — номера элементов разрешения по азимуту и дальности соответственно). В этом массиве «1» означает наличие засветки экрана в элементе разрешения, «0» — ее отсутствие. Разрешение по азимуту выбрано равным 0,25°, разрешение по дальности — 0,5 км, что обеспечивает достаточно высокое качество засветки экрана сигналами от целей в соответствии с [4–7].

Требуемые для работы управляющей программы исходные данные готовятся из расчета 10 целей, 300 кадров, что соответствует продолжительности сценария 30 мин при периоде вращения антенны 6 с и 1,5 ч при периоде вращения 18 с. Они представляют собой текстовый файл, что обеспечивает достаточно компактную запись информации. Подготовка данных для j -й цели в i -м кадре производится в формате iDj , iBj , iPj в следующем порядке:

— 1-я строка (1-й кадр), цели 1...10:

1D1, 1B1, 1P1; 1D2, 1B2, 1P2; ...; 1D10, 1B10, 1P10;

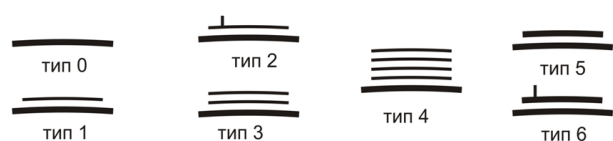


Рис. 2. Типы сигналов от целей:

0 — отметка от цели без сигналов опознавания; 1, 2, 3, 4 — отметка от цели плюс сигналы опознавания, соответственно, I, II, III и IV (VI) режима; 5, 6 — отметка от цели плюс сигналы «Авария / Тревога» I и II режима

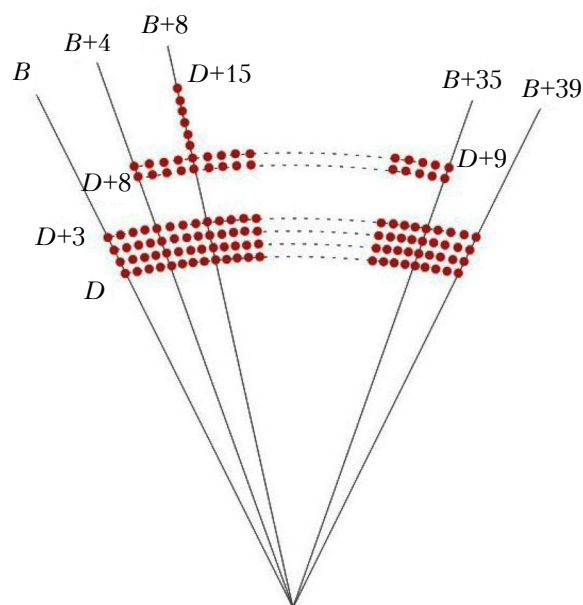


Рис. 3. Фрактал цели типа 2

Массив данных, моделирующих цель типа 2

$B_i \backslash D_i$	0	1	2	3	4	...	7	8	9	...	35	36	37	38	39
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
⋮	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

— 2-я строка (2-й кадр), цели 1...10:

2D1, 2B1, 2P1; 2D2, 2B2, 2P2; ...; 2D10, 2B10, 2P10;

⋮

— 300-я строка (300-й кадр), цели 1...10:

300D1, 300B1, 300P1; 300D2, 300B2, 300P2; ...; 300D10, 300B10, 300P10; !

где iDj , iBj , iPj — расстояние до j -й цели в i -м кадре, выраженное в элементах разрешения по дальности (ЭРД = 1 ... 400), ее азимут (0...359°) и тип (0...6) соответственно; ! — признак окончания сценария.

В тех случаях, когда число целей в сценарии меньше 10, для отсутствующих целей вводятся нулевые данные.

Поскольку одна строка подготовленного таким образом сценария содержит не более 102 символов, объем памяти, требуемой для хранения одного кадра, составляет не более 102 Б, а объем всего сценария — не более 30,6 КБ.

Объем памяти, занимаемой данными о моделях целей, достаточно мал — не более 7 КБ, поэтому они хранятся в памяти ЦП и на размер сценария не влияют.

Сравним эти данные с прямым (растровым) способом хранения данных о сценарии, когда необходимый объем памяти вычисляется так:

— для одного кадра

$$V_k = N_B N_D Z;$$

— для сценария в целом

$$V_0 = V_k N_k,$$

где N_B — количество элементов разрешения по азимуту;

N_D — количество элементов разрешения по дальности;

Z — число разрядов, отводимых для представления одного пиксела на экране ИКО;

N_k — количество кадров.

Если минимальное количество элементов разрешения по азимуту равно 1440, по дальности — 400 (при выбранном разрешении 0,25° по азимуту и 0,5 км по дальности), минимально возможный объем (при $Z = 1$) информацией о сценарии составляет:

— для одного кадра

$$V_k = 1440 \cdot 400 = 576 \text{ Кбит (72 КБ);}$$

— для сценария в целом

$$V_0 = 72 \cdot 300 = 21,6 \text{ МБ.}$$

Таким образом, выигрыш в объеме памяти при предлагаемом способе формирования сценария (не более 30,6 КБ) по сравнению с прямым (не менее 21,6 МБ) составляет как минимум 700 раз.

Имитируемые сценарии формируются заранее (с использованием ПЭВМ) и записываются на флэш-память, которая в дальнейшем подключается к УИС и обеспечивает его работу. Особенность разработанной управляющей программы состоит в том, что сценарии должны находиться в корневом каталоге флэш-накопителя. Для удобства работы с устройством в корневом каталоге хранится до шести сценариев работы УИС.

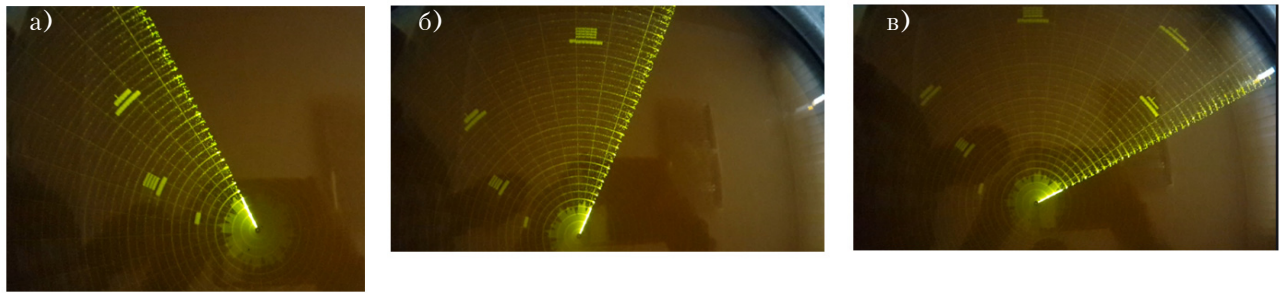


Рис. 4. Образцы формирования сигнально-помеховой обстановки на экране ИКО «Пикет»: а — три цели, сигналы от целей типов 0, 4, 6; б — четыре цели, сигналы от целей типов 0, 4, 6; в — шесть целей, сигналы от целей типов 0, 1, 2, 4, 6



Рис. 5. Внешний вид УИС

На рис. 4 приведены примеры формирования разработанным устройством сигнально-помеховой обстановки на экране ИКО «Пикет». Демонстрируется тестовый режим: стробы по дальности — 5 км, по азимуту — 10° , максимальная дальность — 200 км. В центре развертки имитируется отражение от предметов, находящихся на местности в точке расположения РЛС, в виде сплошной засветки, начальная зона развертки стробируется для предотвращения прожига люминофора в центре экрана, весь экран равномерно засвечен гауссовым шумом, уровень которого регулируется в широких пределах. Из рисунка видно, что система обеспечивает достаточно высокое качество формируемых сигналов.

Устройство выполнено в отдельном малогабаритном корпусе и оснащено соответствующими органами управления, индикации и подключения (рис. 5).

Основные характеристики прибора:

- разрешающая способность по азимуту $0,25^\circ$;
- разрешающая способность по дальности 0,5 км;
- максимальная дальность 200 км;
- максимальное количество целей 10;
- габаритные размеры $350 \times 240 \times 95$ мм;
- масса не более 5 кг;
- питание от сети переменного тока $220 \text{ В} \pm 10\%$, $50 \text{ Гц} \pm 5\%$;
- потребляемая мощность не более 50 ВА;
- необходимость наличия ПЭВМ отсутствует;
- количество обслуживаемых одновременно ИКО 12.

Заключение

Таким образом, разработан компактный, надежный и недорогой имитатор сигнально-помеховой обстановки для индикатора кругового обзора «Пикет». Главным преимуществом устройства перед имеющимися аналогами является то, что для его работы не требуется персональный компьютер и не нужен большой объем памяти — благодаря применению оригинального способа формирования отметок от целей, для хранения сценариев с записанной сигнально-помеховой обстановкой необходимо не более 31 КБ. Имитатор обеспечивает высокое качество изображения развертки и достоверную имитацию работы РЛС в реальных условиях, что подтверждено успешными испытаниями в одном из учебных центров Украины. В настоящее время устройство рекомендовано к серийному производству.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кандырин Н.П. Разработка и изготовление программно-аппаратного комплекса регистрации и отображения радиолокационной информации РЛС с аналоговым выходом // Наука і техника Повітряних Сил Збройних сил України. — 2013. — № 4. — С. 59–63.
2. Крол И. В непростых для Украины условиях мы стараемся создавать приемлемые по цене и качеству авиатренажеры // Человек. Техника. Технологии. Специальный выпуск. — 2017. — С. 22–25.
3. Матвиевский А. В Украине необходимо создавать собственную эффективную учебно-тренировочную базу боевой подготовки // Человек. Техника. Технологии. Специальный выпуск. — 2017. — С. 34–37.
4. ГОСТ 25657. Индикаторы кругового обзора для наземных радиолокационных станций. Типы, основные параметры, технические требования и методы испытаний.
5. Бакулев П.А. Радиолокационные системы : учебник для вузов. — Москва: Радиотехника, 2004.
6. Тяпкин В.Н., Фомин А.Н., Гарин Е.Н. и др. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск : учебник. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011.
7. Радиотехнические системы : учебник для студ. высш. учеб. Заведений / Под ред. Ю. М. Казаринова. — Москва: Издательский центр «Академия», 2008.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 10.04 2017 г.*

I. V. TSEVUCH, A. M. SHEIK-SEIKIN, A. V. SADCHENKO,
O. A. KUSHNIRENKO, Yu. O. SAVCHUK

Україна, Одеський національний політехнічний університет;
м. Одеса, НДІ «Шторм»
E-mail: ans@irt.opu.ua

ІМІТАТОР СИГНАЛІВ ДЛЯ ІНДИКАТОРА КРУГОВОГО ОГЛЯДУ «ПІКЕТ»

Розроблено пристрій імітації сигнально-завадової обстановки для радіолокаційних станцій (РЛС), оснащених індикатором кругового огляду «Пікет», який не вимагає для своєї роботи наявності персональної ЕОМ. Завдяки застосуванню оригінального способу формування позначок від цілей вдалося істотно знизити обсяг пам'яті, необхідної для зберігання інформації про сценарії, достовірно імітуючі роботу РЛС в реальних умовах. Пристрій забезпечує одночасну роботу дванадцяти індикаторів кругового огляду і призначений для оснащення навчальних центрів з підготовки операторів контролю повітряної обстановки.

Ключові слова: імітатор сигналів, індикатор кругового огляду, РЛС, оператор контролю повітряної обстановки.

DOI: 10.15222/TKEA2017.3.19
UDC 621.396

I. V. TSEVUCH, A. N. SHEIK-SEIKIN
A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO, Yu. A. SAVCHUK

Ukraine, Odessa National Polytechnic University;
Odessa, RI «Storm»
E-mail: ans@irt.opu.ua

IMITATOR OF SIGNALS FOR PLAN-POSITION INDICATOR «PICKET»

The authors have developed a device for imitation of the signal-interference environment for radars, equipped with the plan-position indicator (PPI) «Picket», which does not require a PC for operation. Thanks to the use of the original method of forming marks from targets, it was possible to significantly reduce the amount of memory, required to store information about the scenario that reliably imitates the operation of the radar in real conditions. The device provides simultaneous operation of twelve indicators of a circular survey and is intended for equipping training centers for the training of air control operators.

Keywords: imitator of signals, plan-position indicator, radar, operator of air situation control.

REFERENCES

1. Kandyrin N.P. [Development and manufacturing of a hardware-software complex for recording and displaying radar information of a radar with an analog output]. *Nauka i tekhnika Povitryanikh Sil Zbroinikh sil Ukrayini*, 2013, no 4, pp. 59–63. (Rus)
2. Krol I. [In difficult conditions for Ukraine, we are trying to create acceptable for the price and quality of air trainers]. *Chelovek. Tekhnika. Tekhnologii. Spetsialnyi vypusk*, 2017, pp. 22–25. (Rus)
3. Matvievskii A. [In Ukraine, it is necessary to create its own effective base for combat training]. *Chelovek. Tekhnika. Tekhnologii. Spetsialnyi vypusk*, 2017, pp. 34–37. (Rus)

4. State standard 25657. [Round-trip indicators for terrestrial radar stations. Types, basic parameters, technical requirements and test methods]. (Rus)
5. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar systems]. Moscow, Radiotekhnika, 2004, 320 p. (Rus)
6. Tyapkin V.N., Fomin A.N., Garin E.N. et al. *Osnovy postroeniya radiolokatsionnykh stantsii radiotekhnicheskikh voisk* [Fundamentals of the construction of radar stations of radio engineering troops]. Krasnoyarsk, Sib. feder. un-t, 2011, 536 p. (Rus)
7. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio engineering systems]. Ed. by Yu.M. Kazarinov. Moscow, Izdatel'skii tsentr «Akademiya», 2008, 592 p. (Rus)

Д. т. н. А. О. ДРУЖИНІН, д. т. н. Ю. М. ХОВЕРКО, к. т. н. О. П. КУТРАКОВ,
к. т. н. Р. М. КОРЕЦЬКИЙ, С. Ю. ЯЦУХНЕНКО

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ ДВОФУНКЦІЙНОГО СЕНСОРА МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ МІКРОКРИСТАЛІВ Si<B, Ni>

Проведено комплексні дослідження електропровідності та магнетопору деформованих і недеформованих зразків ниткоподібних кристалів Si p-типу провідності з різним ступенем легування бором та домішкою нікелю у широкому інтервалі температур — від 4,2 до 300 К. Виявлено, що найбільший прояв п'єзорезистивного ефекту спостерігається в околі концентрацій, що відповідають переходу «метал — діелектрик». Дослідження магнетопору кристалів проводились в інтервалі полів з індукцією до 14 Тл. Як чутливий елемент двофункційного сенсора деформації та магнітного поля запропоновано застосовувати ниткоподібні кристали кремнію з концентрацією домішки бору $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, працездатні в складних умовах експлуатації.

Ключові слова: сенсор, п'єзорезистивний ефект, ниткоподібний кристал, кремній, нікель, магнетопір.

Розвиток сучасної науки і техніки висуває на перший план проблему створення мініатюрних високочутливих сенсорів механічних величин, працездатних в складних умовах, зокрема за низької температури та в сильних магнітних полях [1—4]. Низькотемпературні дослідження деформаційно-стимульованих ефектів (п'єзоопір, п'єзомагнетопір) в легованих напівпровідниках поблизу переходу «метал — діелектрик» можуть дати інформацію про фізичні властивості таких матеріалів, яка може бути використана для створення на їх основі високочутливих сенсорів фізичних величин, працездатних за низьких температур [2, 3]. Дослідження електропровідності та п'єзоопору ниткоподібних кристалів кремнію (НК) в широкому інтервалі температури та деформації дає змогу визначити робочий інтервал температур сенсорів фізичних величин, зокрема механічних, створених на їх основі.

Для створення сенсорів тиску, деформацій тощо важливим параметром є коефіцієнт тензочутливості НК, що визначається зміною опору кристала внаслідок деформації. У випадку створення сенсорів для інтервалу низьких температур слід враховувати, що електрофізичні властивості напівпровідників визначаються ступенем легування і типом легуючої домішки, ступенем компенсації і мірою наближення до переходу «метал — діелектрик» [3]. Це зумовлює необхідність вивчення впливу ступеня легування та температурної поведінки легуючої домішки

на електропровідність напівпровідникових кристалів кремнію та її зміни під впливом стиску чи розтягу кристалів [4]. З іншого боку дослідження магнетопору легованих ниткоподібних кристалів Si дозволяє поглибити знання про характер їх провідності в області криогенних температур, а також їх поведінку при різноманітних зовнішніх впливах, природу та взаємозв'язки цих ефектів і визначити умови легування кристалів для створення сенсорів, працездатних в сильних магнітних полях. Більше того, відомо, що розбавлені магнетики на основі напівпровідників, в які введено перехідні метали з незаповненою 3d-оболонкою, є перспективними матеріалами для магнітоелектроніки через можливість об'єднання інформації про заряд електрона і спінові ступені свободи [5—7]. В них сильніше проявляються магнетотранспортні ефекти, наявність від'ємного магнетопору, гістерезису тощо. На основі цих структур можна запропонувати цілу низку сенсорів, перемикачів і невзаємних пристроїв вентилів-ізоляторів, MRAM-пам'ять. Принцип роботи таких пристроїв базується на перемиканні між запірним і провідним станами, що забезпечується зміною режиму від феромагнітного до антиферомагнітного — за рахунок впливу локального магнітного моменту орієнтація спінів транспортної домішки відбувається від односпрямованих до протилежно спрямованих спінів в локалізованому стані. Низька вартість і мале енергоспожи-

вання цих приладів забезпечують їх високу конкурентоспроможність.

Водночас, постійно зростаючі вимоги до сенсорних пристроїв поставили ряд складних задач по забезпеченню високого класу точності, надійності, стабільності і підвищення ефективності виробництва. Центром уваги є автоматизація процесів вимірювання. Необхідним стали засоби вимірювань, придатні для одночасного збирання і обробки інформації про значення багатьох змінних в часі величин, які характеризують перебіги технологічних процесів і стани керованих об'єктів.

Метою даної роботи є оцінка можливості створення двофункційних сенсорів (деформації та магнітного поля) для умов роботи за низької температури на основі ниткоподібних кристалів Si, легованих домішками бору і нікелю.

Об'єкт та методика досліджень

Дослідження електропровідності та магнетопору зразків проводились в інтервалі температур від 4,2 до 300 К на кількох групах ниткоподібних кристалів Si *p*-типу з різним ступенем легування бором та з домішкою нікелю (вводилась методом низькотемпературної, до 800°C, термічної дифузії з плівки, осадженої на поверхні кристалу [8]).

Зразки для досліджень були вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій в формі ниткоподібних кристалів з орієнтацією $\langle 111 \rangle$ з концентрацією носіїв заряду $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що відповідає близькості до переходу «метал — діелектрик» (ПМД) [9, 10].

Під час проведення експериментів за криогенних температур було використано оригінальну та просту в реалізації методику, запропоновану в [10]: мікрокристал Si закріплювався на підкладці за допомогою клею ВЛ-931 з температурою полімеризації +180°C, і одновісна деформація забезпечувалась внаслідок різниці коефіцієнтів термічного розширення матеріалів НК та підкладки (рис. 1).

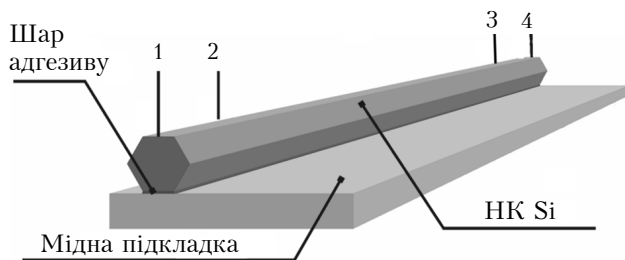


Рис. 1. Ілюстрація методу створення одновісної деформації мікрокристала:

1, 4 — струмові контакти; 2, 3 — потенціальні контакти

Для дослідження властивостей НК Si в магнітних полях до 14 Тл використано спеціальну методику, яка дозволяє вимірювати магнетоопір за різних фіксованих температур. Магнітне поле створювали з допомогою біттерівського магніту з індукцією до 14 Тл та часом розгортки по полю 1,75 Тл/хв за температури рідкого гелію та 3,5 Тл/хв в інтервалі температур 4,2–77 К. Магнетоопір вимірювався протягом певного часу за поступового зменшення магнітного поля від 14 Тл до нуля. Дослідження проводились у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур у м. Вроцлав, Польща.

Експериментальні результати та їх обговорення

На рис. 2 зображено температурну залежність опору та магнетоопору мікрокристалів кремнію з концентрацією легуючої домішки бору $N_B > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що відповідає металевому боку ПМД. Як видно, залежність питомого опору сильнолегованого мікрокристалу кремнію в усьому досліджуваному температурному інтервалі має типовий металевий характер.

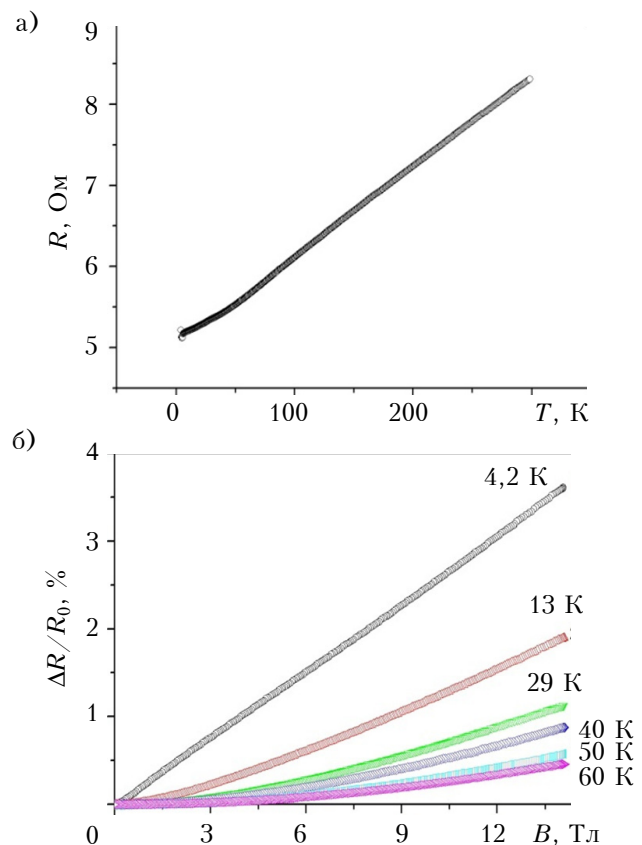


Рис. 2. Температурна залежність НК Si ($\rho_{300\text{K}} = 0,007 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) з домішкою нікелю та бору і концентрацією легуючої домішки, що відповідає металевому боку ПМД (а), а також польова залежність його магнетоопору для різних температур (б)

Суттєвого впливу деформації на характеристики таких мікрокристалів виявлено не було. Слабка залежність магнетоопору НК Si з металевим характером провідності, що зумовлена слабкою локалізацією носіїв заряду, матиме принципове значення при застосуванні таких мікрокристалів як чутливих елементів сенсорів теплових величин, працездатних в сильних магнітних полях. За температур рідкого гелію максимальний магнетоопір сягає не більше 4% в магнітних полях з індукцією до 14 Тл.

Результати дослідження температурної залежності опору та магнетоопору мікрокристалів кремнію з концентрацією легуючої домішки бору, що відповідає діелектричному боку ПМД ($\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) зображено на **рис. 3**.

Необхідно зазначити, що вплив деформації спостерігається тільки в НК Si *p*-типу з концентрацією домішки, що відповідає наближенню до критичної концентрації ПМД, і відсутній у НК Si *p*-типу з металевого боку ПМД, тобто на вільних дірках. В той самий час, він зменшується

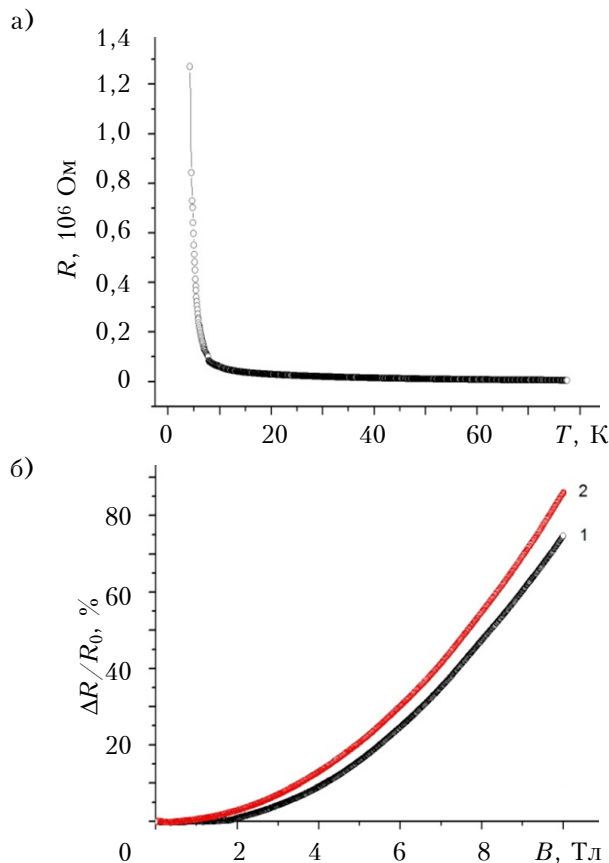


Рис. 3. Температурна залежність НК Si ($\rho_{300\text{K}} = 0,025 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) з домішкою нікелю та бору з концентрацією легуючої домішки, що відповідає діелектричному боку ПМД (а), а також польова залежність його магнетоопору за температури 4,2 К в поєднанні з температурою (1) та поперечному (2) напрямках по відношенню до напрямку магнітного поля (б)

для мікрокристалів Si з концентрацією бору, що відповідає діелектричному боку ПМД і глибокій діелектричній ділянці, тобто слабшає у разі переходу до кристалів зі зменшеним ансамблем локалізованих дірок. Перший чинник свідчить про те, що для отримання ефекту деформування носії заряду мають бути локалізовані. Другий чинник вказує на необхідність достатньої концентрації локалізованих магнітних диполів, тобто можливої деякої граничної взаємодії. При цьому кожній локалізованій дірці можна приписати магнітний дипольний момент, що взаємодіє з навколишніми носіями заряду і зовнішнім магнітним полем. Ці ефекти яскраво спостерігались під час дослідження мікрокристалів кремнію з концентрацією легуючої домішки бору в околі ПМД ($N_B \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), що відповідає діелектричному боку ПМД.

На **рис. 4** зображено температурну залежність опору мікрокристалів Si з питомим опором за температури 300 К $\rho_{300\text{K}} = 0,012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, що відповідає діелектричному типу провідності поблизу ПМД. Як видно, за криогенних температур під дією одновісної деформації стиску питомий опір цих кристалів зменшується в декілька разів, що свідчить про прояв неklasичного п'єзорезистивного ефекту. При зменшенні концентрації бору в кремнії, тобто при віддаленні від ПМД в діелектричну область, цей ефект зменшується. Це також підтверджується розрахованими з експериментальних даних температурними залежностями коефіцієнта тензочутливості для цих кристалів. Коефіцієнт тензочутливості для цих зразків в області гелієвих температур досягає значення $K_{4.2\text{K}} = 165$ за деформації стиску $\epsilon = -5,29 \cdot 10^{-3}$ відн. од. Виявлено також вплив деформування на

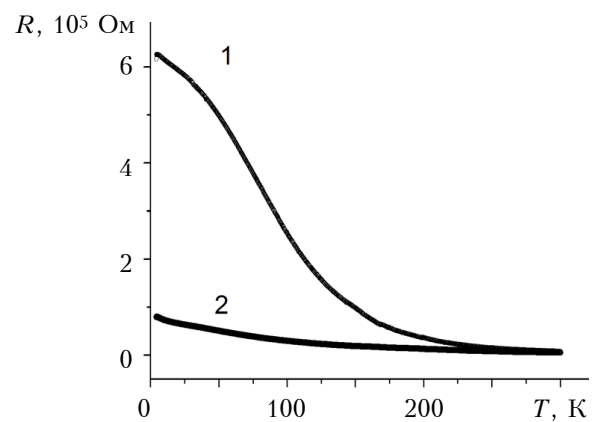


Рис. 4. Температурні залежності питомого опору недеформованого (1) та деформованого стискуванням (2) НК Si ($\rho_{300\text{K}} = 0,012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$)

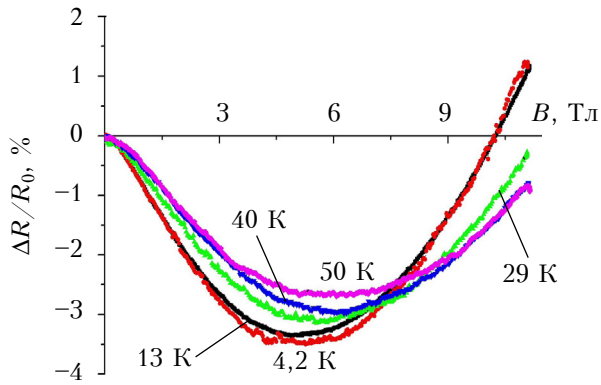


Рис. 5. Польова залежність поздовжнього магнетопору деформованих стиском НК Si<B, Ni>, легованих до концентрації $N_B < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, за криогенних температур

магнетоопір цих зразків (рис. 5), коли його значення зменшилось майже у 3 рази в порівнянні з недеформованими зразками [6, 11].

З огляду на високу тензочутливість кристалів кремнію із $\rho_{300\text{K}} = 0,012 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, для них було розраховано температурну залежність коефіцієнта тензочутливості, зображену на рис. 6.

Наведені результати досліджень тензометричних характеристик НК Si<B, Ni> дозволяють прогнозувати можливість створення на основі цих кристалів чутливого сенсора механічних величин, працездатного в інтервалі температур від гелієвих до кімнатної. При використанні НК Si як чутливих елементів п'єзорезистивних сенсорів розрахована величина вихідного сигналу за $T = 4,2 \text{ К}$ становить приблизно 100 мВ при застосуванні мостової схеми з двома активними чутливими елементами.

Враховуючи дані роботи [11], як чутливий елемент магнітного поля можна використати недеформовані зразки ниткоподібних кристалів Si p -типу, легованих бором та домішкою нікелю, концентрація бору в яких знаходиться у безпосередній близькості до діелектричного боку переходу «метал — діелектрик». Принцип роботи таких приладів заснований на значному маг-

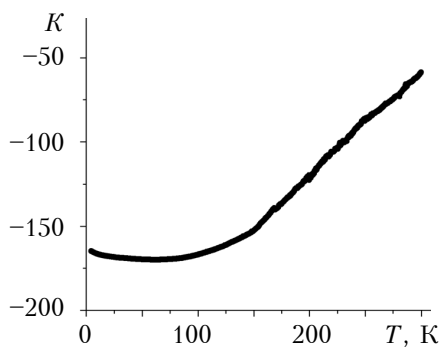


Рис. 6. Температурна залежність коефіцієнта тензочутливості деформованих стиском НК Si<B, Ni> ($\rho_{300\text{K}} = 0,012 \text{ Ом} \cdot \text{см}$)

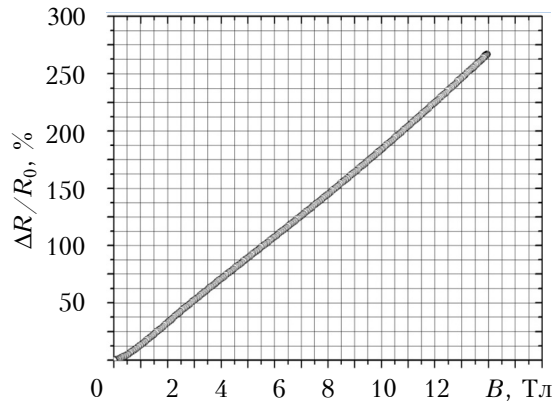


Рис. 7. Градуювальна характеристика магнітної складової чутливого елементу сенсора магнітного поля та деформації

неторезистивному ефекті, який проявляється в залежності магнетоопору від індукції магнітного поля, досягаючи 250% при 14 Тл (рис. 7).

Двофункційний сенсор магнітного поля та деформації на основі НК Si<B, Ni> може містити чутливий елемент з двох однакових кристалів, розташованих взаємно перпендикулярно. Один кристал вимірює деформацію і не реагує на магнітне поле, оскільки його повздовжній магнетоопір близький до нуля в широкому інтервалі магнітних полів — до 11 Тл (рис. 6). Невелику зміну магнетоопору можна компенсувати апаратними, чи програмними засобами. Інший кристал чутливий до магнітного поля.

Висновки

Дослідження електрофізичних властивостей деформованих та недеформованих ниткоподібних кристалів Si p -типу з різним ступенем легування бором та домішкою нікелю у широкому інтервалі температур (4,2 — 300 К) та в сильних магнітних полях (до 14 Тл) показало, що для застосування у двофункційному сенсорі магнітного поля та деформації придатними є мікрокристали Si<B, Ni> з концентрацією домішки бору $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, що відповідає переходу «метал — діелектрик» у кремнії. Виявлено, що як магнітну складову чутливого елементу двофункційного сенсора необхідно використовувати мікрокристали кремнію, концентрація бору в яких знаходиться у безпосередній близькості до переходу «метал — діелектрик». Принцип роботи такого чутливого елемента заснований на значному магнеторезистивному ефекті, який проявляється в залежності магнетоопору від індукції магнітного поля, досягаючи 250% при 14 Тл за гелієвих температур. Водночас, деформаційна складова двофункційного сенсора містить мікрокристали кремнію з $\rho_{300\text{K}} = 0,012 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, концентрація бору в яких відповідає діелектричному боку переходу «метал — діелектрик».

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Barlian A. A., Park S. J., Mukundan V., Pruitt B.L. Design and characterization of microfabricated piezoresistive floating element-based shear stress sensors // Sens Actuators, A. — 2007. — Vol. 134. — P. 77–87.
2. Баранський П. І., Федосов А. В., Гайдар Г. П. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу. — Луцьк: Надстир'я, 2000.
3. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Koretskii R. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures // Materials Science in Semiconductor Processing. — 2015. — Vol. 40. — P. 766–771. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.015>
4. Дружинин А. А., Островский И. П., Когут Ю. Р. Нитевидные кристаллы кремния, германия и их твердых растворов в сенсорной электронике. — Львов: Изд. НУ «Львівська політехніка», 2010.
5. Ferrand D., Cibert J., Wasiela A. et al. Hysteresis in the magneto-transport of manganese-doped germanium: evidence for carrier-mediated ferromagnetism // Phys. Rev.B. — 2001. — Vol. 63. — P. 085201.
6. Yatsukhnenko S., Druzhinin A., Ostrovskii I. et al. Nanoscale conductive channels in silicon whiskers with nickel impurity // Nanoscale Research Letters. — 2017. — Vol. 12(78). — P. 1–7. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1855-9>

7. Morresi L., Pinto N., Ficcadenti M. et al. Magnetic and transport polaron percolation in diluted GeMn films // Materials Science and Engineering B. — 2006. — N 126. — P. 197–201. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2005.09.025>
8. Nasriddinov S. S. Investigation of temperature sensors based on Si <P, Ni> // Journal of nano- and electronic physics. — 2015. — Vol. 7, № 3. — P. 03037-5.
9. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P. Investigation of Si-Ge whiskers growth by CVD // Phys. Stat. Sol. (C). — 2004. — Vol. 1, N 2. — P. 333–336. <https://doi.org/10.1002/pssc.200303948>
10. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I. et al. Studies of piezoresistance and piezomagneto-resistance in Si whiskers at cryogenic temperatures // Crystal Research and Technology. — 2002. — Vol. 37, № 2-3. — P. 243–257. [https://doi.org/10.1002/1521-4079\(200202\)37:2/3<243::AID-CRAT243>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/1521-4079(200202)37:2/3<243::AID-CRAT243>3.0.CO;2-L)
11. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Yatsukhnenko S. Magnetic properties of doped Si<B, Ni> whiskers for spintronics // Journal of Nano Research. — 2006. — Vol. 39. — P. 43–54. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.43>

Дата надходження рукопису
до редакції 22.05 2017 р.

А. А. ДРУЖИНИН, Ю. Н. ХОВЕРКО, А. П. КУТРАКОВ, Р. Н. КОРЕЦКИЙ, С. Ю. ЯЦУХНЕНКО

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДВУХФУНКЦИОНАЛЬНОГО СЕНСОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДЕФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МИКРОКРИСТАЛЛОВ Si <B, Ni>

Проведены комплексные исследования электропроводимости и магнетосопротивления деформированных и недеформированных образцов нитевидных кристаллов (НК) Si p-типа с разной степенью легирования бором и примесью никеля в широком интервале температур (от 4,2 до 300 К) и при полях с индукцией до 14 Тл. Установлено, что наибольшее проявление пьезорезистивного эффекта наблюдается в окрестности концентраций, соответствующих переходу «металл — диэлектрик».

Образцы для исследований были выращены методом химических газотранспортных реакций в форме НК с кристаллографической ориентацией <111> с концентрацией носителей заряда, соответствующей близости к переходу «металл — диэлектрик» ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), и введением примеси никеля методом низкотемпературной (до 800°C) термической диффузии из осажденной на поверхности кристалла пленки. Для создания одноосной деформации микрокристаллы Si закреплялись на подложках с отличающимся от кристалла коэффициентом термического расширения.

Для сильнолегированных микрокристаллов кремния (с концентрацией примеси бора более $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), как недеформированных, так и деформированных, температурная зависимость удельного сопротивления имеет типичный металлический характер. Существенного влияния деформации на характеристики таких микрокристаллов не обнаружено. При гелиевых температурах максимальное магнетосопротивление составляет не более 4% в магнитных полях с индукцией до 14 Тл.

При криогенных температурах под действием одноосной деформации сжатия удельное сопротивление кристаллов Si ($\rho_{300\text{K}} = 0,012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, что соответствует диэлектрическому типу проводимости вблизи ПМД) уменьшается в несколько раз. При уменьшении концентрации бора в кремнии, то есть при удалении от ПМД в диэлектрическую область, этот эффект уменьшается. Это также подтверждается рассчитанными из экспериментальных данных температурными зависимостями коэффициента тензочувствительности для этих образцов в области гелиевых температур, который достигает значения $K_{4,2\text{K}} = 165$ при деформации сжатия $\epsilon = -5,29 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. Выявлено также влияние деформирования на магнетосопротивление этих образцов, когда его значение уменьшилось почти в 3 раза.

В качестве чувствительного элемента магнитного поля можно использовать деформированные образцы нитевидных кристаллов Si p-типа, легированные бором и примесью никеля, концентрация бора в которых находится в непосредственной близости к переходу «металл — диэлектрик» с диэлектрической стороны ПМД. В зависимости магнетосопротивления от индукции магнитного поля таких кристаллов проявляется значительный магнеторезистивный эффект, достигающий 250% при 14 Тл.

Ключевые слова: сенсор, пьезорезистивный эффект, нитевидный кристалл, кремний, никель, магнетосопротивление.

TWO-FUNCTIONAL SENSOR OF MAGNETIC FIELD AND DEFORMATION
BASED ON Si <B, Ni> MICROCRYSTALS

This research investigates complex studies of electrical conductivity and magnetoresistance of both strain and non-strain samples of p-type Si whiskers with different degrees of doping with boron and nickel in a wide temperature range from 4.2 to 300 K. It is established that the greatest manifestation of the piezoresistive effect is observed in the vicinity of concentrations which correspond to the metal-insulator transition. Investigation of the magnetoresistance of crystals was carried out in the range of fields with induction up to 14 T. Whiskers of silicon with a doping concentration of boron of $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ can be used as a sensitive element for two-functional deformation and magnetic field sensors in difficult operating conditions.

Microwires for research were grown by chemical transport reactions with the crystallographic orientation <111> and with the concentration of charge carriers, which corresponds to the vicinity of metal-insulator transition ($5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). The nickel doping was conducted by the low-temperature diffusion from the precipitated film on the surface of the crystal. The uniaxial strain of Si microcrystals was carried out by fixing them on substrates with the different coefficient of thermal.

The metallic-type temperature dependence on the resistivity is typical for heavily doped silicon microcrystals (with the boron concentration $> 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) for both deformed and non deformed samples. Significant influence of the deformation on characteristics of microcrystals wasn't found. The maximum magnetoresistance of such samples doesn't exceed 4% in magnetic fields with induction of 14 T at the temperature of liquefied helium.

The resistivity of Si crystals with $\rho_{300\text{K}} = 0.012 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$ (which corresponds to the dielectric side of MIT) is reduced in several times at the temperature of liquefied helium and under the uniaxial deformation. Decreasing of boron concentration reduces this effect. This is also confirmed by the calculation of the experimental data temperature dependence of gauge factor for these samples in helium temperatures. The gauge factor is $K_{4,2\text{K}} = 165$ at the compressive strain $\epsilon = -5.29 \cdot 10^{-3} \text{ RVUs}$. It is also found that the deformation of these samples has significant impact on characteristics of the magnetoresistance and the value of the magnetoresistance decreased almost in 3 times.

The undeformed samples of Si p-type microwire doped with nickel and boron concentration in the vicinity of dielectric side to MIT can be used as the sensing element of magnetic field. The significant magnetic field dependence on magnetoresistance is observed in such crystals which can reach a value of 250% at 14 T.

Keywords: sensor, piezoresistive effect, whisker crystal, silicon, nickel, magnetoresistance.

REFERENCES

1. Barlian A. A., Park S. J., Mukundan V., Pruitt B.L. Design and characterization of microfabricated piezoresistive floating element-based shear stress sensors. *Sens Actuators, A*, 2007, vol. 134, pp. 77-87.
2. Baranskii P. I., Fedosov A. V., Gaidar G. P. [Physical properties of Si and Ge crystals in the fields of effective external influence]. Lutsk: Nadstyrja; 2000 (Ukr)
3. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Koretskii R. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, vol. 40, pp. 766-771. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.015>
4. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P., Kohut Yu.R. [Nytokopodibni krystaly kremniiu, germaniiu ta yihnih tverdyh rozchyniv u sensornii elektronitsi]. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2010, 200 p. (Ukr)
5. Ferrand D., Cibert J., Wasila A., Bourgognon C., Tatarenko S., Fishman G., Andrearczyk T., Jaroszyński J., Kolesnik S., Dietl T. et al. Hysteresis in the magneto-transport of manganese-doped germanium: evidence for carrier-mediated ferromagnetism. *Phys. Rev. B*, 2001, vol. 63, pp. 085201.
6. Yatsukhnenko S., Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Chernetskiy M. Nanoscale conductive channels in silicon whiskers with nickel impurity. *Nanoscale Research Letters*, 2017, vol. 12(78), pp. 1-7. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-1855-9>
7. Morresi L., Pinto N., Ficcacanti M., Murri R., D'Orazio F., Lucari F. Magnetic and transport polaron percolation in diluted GeMn films. *Materials Science and Engineering B*, 2006, vol. 126, pp. 197-201. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2005.09.025>
8. Nasriddinov S. S. Investigation of Temperature Sensors Based on Si <P, Ni>. *Journal of nano- and electronic physics*, 2015, vol. 7, no 3, pp. 03037-5.
9. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P. Investigation of Si-Ge whiskers growth by CVD. *Phys. Stat. Sol. (C)*, 2004, vol. 1, no. 2, pp. 333-336. <https://doi.org/10.1002/pssc.200303948>
10. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Oszwaldowski M., Berus T., Kunert H. Studies of piezoresistance and piezomagnetoresistance in Si whiskers at cryogenic temperatures. *Crystal Research and Technology*, 2002, vol. 37, no. 2-3, pp. 243-257. [https://doi.org/10.1002/1521-4079\(200202\)37:2/3<243::AID-CRAT243>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/1521-4079(200202)37:2/3<243::AID-CRAT243>3.0.CO;2-L)
11. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Yatsukhnenko S. Magnetic properties of doped Si<B,Ni> whiskers for spintronics. *Journal of Nano Research*, vol. 39, pp. 43-54. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.43>

К. ф.-м. н. В. П. ВЕЛЕЩУК, д. ф.-м. н. А. И. ВЛАСЕНКО, к. ф.-м. н. З. К. ВЛАСЕНКО, к. ф.-м. н. В. В. ШИНКАРЕНКО, к. т. н. Я. Я. КУДРИК, П. О. САЙ, к. ф.-м. н. В. В. БОРЩ*

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ;

*Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

E-mail: vvvit@ukr.net

ВЛИЯНИЕ РАЗБРОСА ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ RGB-СВЕТОДИОДОВ НА ОДНОРОДНОСТЬ СВЕЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ЭКРАНОВ ПРИ МИНИМАЛЬНОЙ ГРАДАЦИИ ЯРКОСТИ

Рассмотрены проблемы неоднородности свечения светодиодных RGB-экранов при низких, минимальных градациях яркости, вызванные неоднородностью свечения светодиодов. Установлено, что наибольший разброс значений электрических параметров отдельных RGB-светодиодов (FM-Z3535RGBW) имеют структуры синего цвета излучения $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}$. Подтвержден технический предел улучшения качества светодиодных экранов — возможность уменьшения длительности нагрузок до 6–8 нс на светодиод.

Ключевые слова: RGB-светодиод, электрические параметры, неоднородность свечения, InGaN/GaN .

Светодиоды и изделия на их основе нашли широкое применение в повседневной жизни, пройдя путь от индикации процессов к передаче цветов и оттенков. В настоящее время промышленно изготавливаются светодиодные экраны различных типов, качественная работа которых зависит от однородности передачи цветов целого массива светодиодов (СД).

Одной из проблем производства СД-экранов является достижение однородности свечения отдельных СД для всего диапазона яркости и для всех цветов [1], а также достижение максимально большого соотношения «минимальная/максимальная яркость» для всего цветового диапазона. Установлено, что при низких (минимальных) градациях яркости проявляется хаотичная неоднородность свечения, которая увеличивается с уменьшением яркости и наблюдается для структур синего цвета излучения (рис. 1, 2). Причиной этого эффекта не может быть разброс значений тока I с выводов драйверов, поскольку величина разброса тока от канала к каналу драйвера составляет $\pm 1\%$ (typ) ... $\pm 3\%$ (max), от драйвера к драйверу — $\pm 1\%$ (typ) ... $\pm 2\%$ (max) [2], и если бы это влияло на однородность свечения, то СД-экраны содержали бы темные полосы, в то время как в нашем случае неоднородность хаотичная.

Существуют различные виды и, соответственно, причины возникновения неоднородности изображений СД-экранов по яркости. Самая рас-

пространенная — неодинаковость (разброс) яркости отдельных СД. В нашем же случае неоднородность обусловлена тем, что часть синих светодиодов не включена, поскольку через них

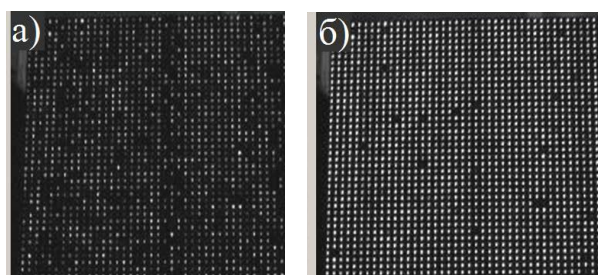


Рис. 1. Фотография части светодиодного экрана при низких градациях свечения синих структур (а — 50-я, б — 80-я градация из $2^{16} = 65536$ возможных), полученная сразу после изготовления светодиодного экрана во время испытаний

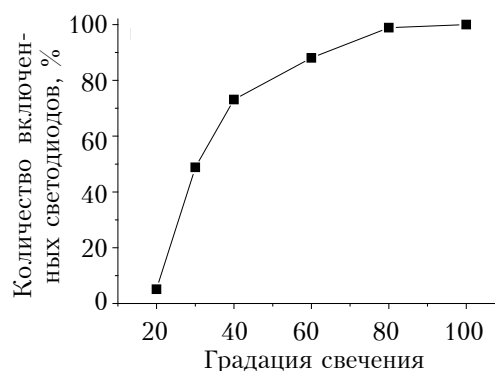


Рис. 2. Зависимость количества включенных светодиодов (нормированного к общему количеству, равному 4096) от градации свечения синих структур

Публикация содержит результаты исследований, проведенных при грантовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (№ заявки 32472 конкурса Ф76).

не протекает ток, достаточный для появления излучения.

Причиной неоднородности может быть разброс электрических и световых параметров отдельных RGB-структур светодиодов ввиду особенностей технологии их изготовления [3]. В настоящей работе исследовался разброс значений параметров вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик промышленно изготавливаемых RGB-структур светодиодов, а также время нарастания/спада импульса электролюминесценции структур синего излучения.

Условия проведения эксперимента

Изучались типичные промышленно изготавливаемые RGB-светодиоды FM-Z3535RGBW до введения их в эксплуатацию. Согласно документации производителя, структуры изготовлены из таких полупроводников: красный цвет излучения — AlGaInP, зеленый — $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}/\text{GaN}$, синий — $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}$. Номинальный рабочий ток для всех структур составляет 20 мА.

Вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики при постоянном напряжении и импульсы электролюминесценции (ЭЛ) при длительности импульса тока 40, 100, 300 нс были получены при комнатной температуре. Дискретность установления постоянного напряжения — от 2,5 мВ, диапазон измерения емкости — от 10^{-15} до 10^{-7} Ф. Поскольку данные светодиоды в экранах для трансляции видео работают в импульсном режиме тока (широотно-импульсная модуляция) с высокими частотами обновления изображения, измерение ВФХ происходило при модулированном сигнале частотой 1 МГц.

Вольт-амперные характеристики структур

Механизмы токопрохождения и функциональная зависимость «ток — напряжение» в гетероструктурах $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}$ (рис. 3, а, б) в целом известны (см., например, [4, 5]). При напряжении 1,2–2,25 В ток $I \sim \exp(eU/E_i)$, где показатель экспоненты E_i очень слабо зависит от температуры, т. е. ВАХ в полулогарифмическом масштабе имеет участок, близкий к линейному с постоянным наклоном. При напряжении $U > 2,6$ В (напряжение включения ЭЛ) преобладает инжекционная компонента тока, $I = I_0 \exp(eU/(nkT))$, наблюдается резкий экспоненциальный рост при инжекции в активную область (в квантовую яму $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$). В полулогарифмическом масштабе ВАХ также близка к прямой, но с другим наклоном. При больших токах протекания (свыше 10^{-3} А) из-за последовательного сопротивления R_s омических контактов происходит термический разогрев, в результате чего наблюдаются отклонения от линейности в полулогарифмических координатах [4, 5].

Видно, что для синих структур ВАХ групп А и Б отличается от другой совокупности ВАХ, которые хорошо сгруппированы — кривые А имеют меньший ток в диапазоне изменения напряжения от 2,5 до 3 В. Это согласуется с ВФХ, приведенными далее: диффузная емкость структур группы А на рис. 3, б самая низкая среди всех десяти. ВАХ структур группы Б имеют больший туннельный ток. Мы предполагаем, что указанные отклонения поведения вольт-амперных характеристик группы А на рис. 3 (а, б) приводят к нелинейности свечения, которая может быть скомпенсирована аппаратным способом (см., например, [2]). Поведение ВАХ группы Б при малых токах соответствует безызлучательной рекомбинации, которая и приводит к отсутствию свечения при малой градации яркости, которая не может быть исправлена аппаратными методами. Исправление подобного разброса может быть проведено с помощью дополнительной отбраковки светодиодов, оценка результативности которой проводилась в [6].

Что касается структур зеленого и красного излучения, их ВАХ хорошо сгруппированы, в полулогарифмическом масштабе зависимость практически прямая, что указывает на удовлетворительную технологическую однородность структур.

В процессе исследований установлено, что все значения напряжения при номинальных значениях тока попадают в интервал согласно спецификации данных светодиодов. Значит, для использования подобных светодиодов в изготовлении высококачественных экранов с большим контрастом необходимо либо ужесточение спецификации, либо создание внутренней линии сортировки.

Вольт-фарадные характеристики структур

Барьерная емкость $C_{\text{БАР}}$ в резком переходе (в $p^+ - n^-$ или $p - n^+$ -переходе, когда один из контактирующих полупроводников имеет существенно высшую концентрацию основных носителей заряда) описывается как

$$C_{\text{БАР}} = \sqrt{\frac{e\epsilon_s N_B}{2} \frac{1}{U_{bi} \pm U - 2kT/e}},$$

где e — заряд электрона;

ϵ_s — диэлектрическая постоянная полупроводника;

N_B — концентрация носителей в менее легированном полупроводнике;

U_{bi} — напряжение, обусловленное высотой барьера на $p - n^-$ -переходе;

k — постоянная Больцмана;

T — температура.

При расчете $C_{\text{БАР}}$ знак «+» или «-» при U выбирается в зависимости от направления смещения.

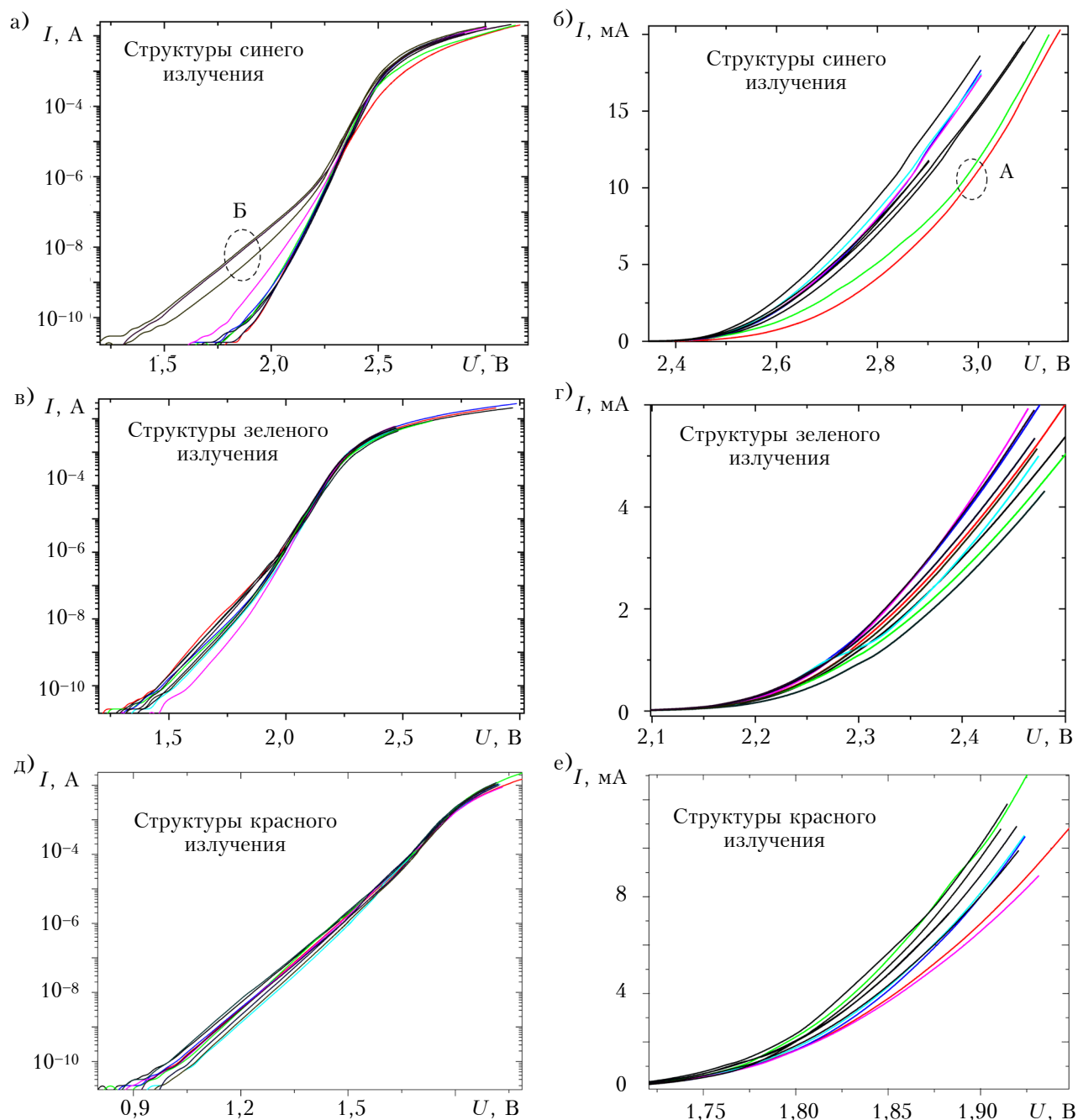


Рис 3. ВАХ десяти исследованных структур синего (а, б), зеленого (в, г) и красного (д, е) цвета излучения RGB-светодиода, представленные в полулогарифмическом (слева) и линейном (справа) масштабе

Диффузная емкость $C_{\text{диф}}$ связана с протеканием прямого (диффузного) тока I и пропорциональна ему и времени жизни τ неосновных носителей заряда:

$$C_{\text{диф}} = \frac{e}{nkT} \tau I = \frac{e}{nkT} \tau I_0 \exp \frac{eU}{nkT}.$$

Общая емкость $C = C_{\text{бар}} + C_{\text{диф}}$, где при прямом падении напряжения (рис. 4) доминирует $C_{\text{диф}}$.

Из рис. 4, а видно, что емкость «синих» структур колеблется от 72,9 до 180,2 пФ при напряже-

нии 3 В. Меньшую диффузную емкость имеют структуры 2 и 3 (группа А на рис. 3, б). Также видно, что ВФХ структур 7, 8, 9 (группа Б на рис. 3, а) с увеличенными туннельными токами (от 10^{-10} до 10^{-6} А на ВАХ) более пологие — туннельный ток влияет на диффузионную емкость.

Наклоны ВФХ большинства структур близки к линейным и монотонно возрастают в диапазоне изменения напряжения от 1,5 до 2 В, что указывает на однородность легирования в области перехода. Параллельность кривых (оди-

наковый наклон) в этом диапазоне для структур 5, 10 является показателем того, что это очень качественные структуры. Образцы 2 и 3 имеют худший профиль легирования и меньшую емкость, а также требуют большего напряжения при рабочем токе (см. рис. 3, б), что и может быть причиной рассогласования при работе в массиве с другими СД.

Наклон ВФХ структур 7, 8, 9 существенно отличается от ВФХ тех же структур 5 и 10 в диапазоне $U = 1 - 2$ В, что указывает на различия в профиле легирования их $p-n$ -перехода и его

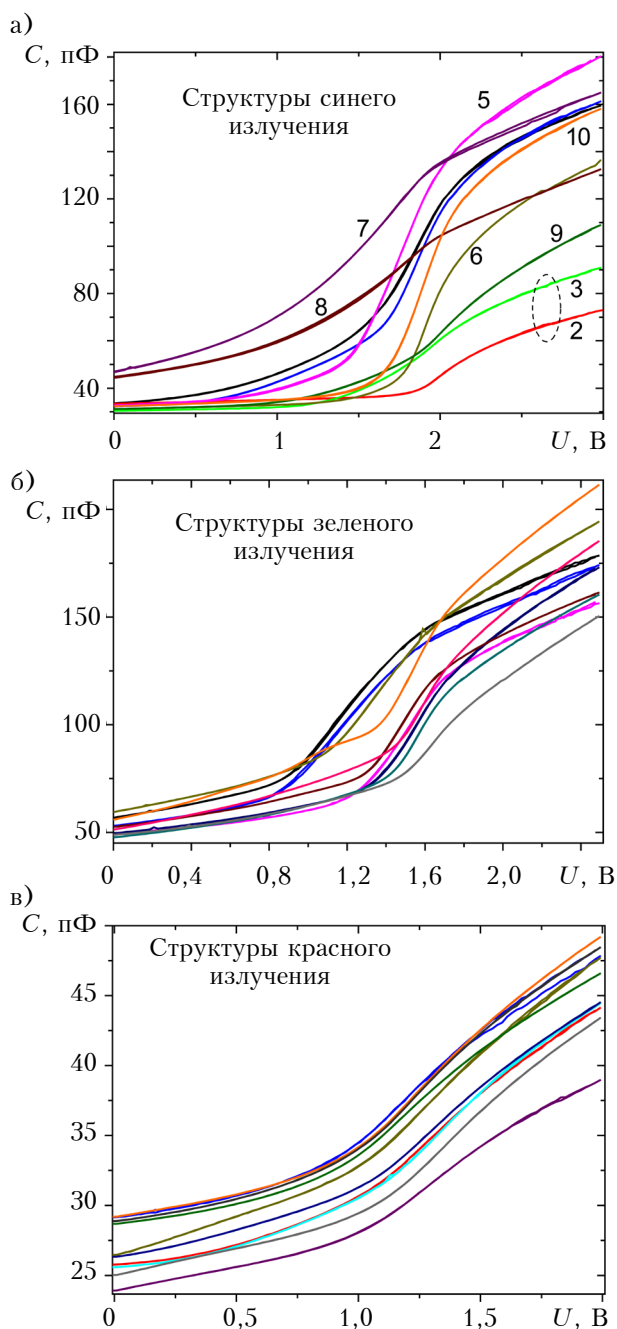


Рис. 4. ВФХ десяти исследованных структур синего (а), зеленого (б) и красного (в) цвета излучения RGB-светодиода

размытость. Этот недостаток может возникать в процессе технологического отжига или при перегреве и фактически не может быть исправлен после появления.

Среди «зеленых» структур имеется три, ВФХ которых отличаются следующей особенностью: включение их диффузионной емкости начинается уже при 0,9 В, то есть «горбы» сдвинуты в область низких значений напряжения (рис. 4, б). Это не является критическим и характерно для таких структур зеленого цвета излучения, а обусловлено, вероятно, высокопроводящими областями с увеличенным содержанием индия в слое структуры $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$.

ВФХ «красных» структур в области от 0 до 2 В (рис. 4, в) практически одинаковы, а разброс значений их емкости небольшой (10 пФ).

Обсуждение результатов

Известно, что разброс электрических и световых параметров светодиодных структур, изготовленных в одном технологическом цикле на общей пластине-подложке, обусловлен сугубо технологическими причинами, возникающими при их эпитаксии, формировании омических контактов и технологических обработках [3]. Большую роль здесь играет однородность по площади состава квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, ее толщины (около 3 нм) и резкость профилей гетерограниц $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}$, а также вариация сопротивления омических контактов.

Для «синих» кристаллов распределение по напряжению включения в области 2,5 В (где ток мал и последовательное сопротивление R_s имеет минимальное влияние) связано с неоднородностью активной области через флуктуации реагентов при MOCVD-эпитаксии, а различия значений прямого напряжения при рабочем токе порядка 10 мА (большой ток и последовательное сопротивление R_s имеет значительное влияние) — с разбросом величины удельного контактного сопротивления контактов к n - и p -слоям.

Установлено, что разброс значений напряжения при фиксированном токе 5 мА составляет 0,15 В для синих структур, 0,08 В для зеленых и 0,034 В для красных. Такой постоянный ток, с нашей точки зрения, должен коррелировать с работой светодиодов при импульсных нагрузках субмикросекундной длительности. Разброс значений емкости при фиксированном напряжении составляет $180 - 73 = 107$ пФ при напряжении 3 В для синих структур, $210 - 150 = 60$ пФ при 2,5 В для зеленых и $49 - 39 = 10$ пФ при 2 В для красных, что в пересчете на потребляемую мощность, которая влияет на интенсивность свечения, составит 0,75; 0,4 и 0,17 мВт соответственно. Как видно, наибольший разброс параметров наблюдается у структур синего излучения.

Еще одним существенным фактором, который влияет на неоднородность свечения массива светодиодов, может быть максимальная частота переключения (срабатывания) светодиодов,

которая в импульсном режиме будет ограничена временем нарастания и спада импульса тока и, соответственно, электролюминесценции [7].

Минимальная длительность импульса тока в современных СД-экранах, принцип действия которых основан на широтно-импульсной модуляции, достигает 40 — 60 нс. Частота передачи данных специальных драйверов импульсного тока СД-экранов составляет 33 МГц [1]. Поэтому нами было измерено время нарастания/спада импульса ЭЛ структур синего излучения (рис. 5). Для этого был использован генератор наносекундных импульсов Г 5-48, электролюминесценция регистрировалась кремниевым $p-i-n$ -фотодиодом SFH 203 P и осциллографом Tektronix TDS 2022. Установлено, что фронт нарастания/спада импульса ЭЛ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ -структур исследуемых RGB-СД составляет 6 — 8 нс, что является типичным для светодиодов на основе нитрида галлия [7]. Как видно из рис. 5, данные светодиоды хорошо срабатывают при длительности импульса тока выше сотни наносекунд, а временная зависимость их интенсивности свечения близка к прямоугольной. При меньших значениях длительности сигнал приобретает треугольную форму, что приводит к нелинейной зависимости интегральной по времени интенсивности от длительности импульса, что должно приниматься во внимание при необходимости повышения контрастности СД-экранов.

Выводы

Проведенные исследования RGB-светодиодов (FM-Z3535RGBW) показали, что наибольший разброс электрических характеристик имеют структуры синего цвета излучения. Анализ электрических характеристик (ВАХ, ВФХ) показал наличие неоднородных полупроводниковых переходов и омических контактов в синих светодиодах (в частности, участки ВАХ, которые могут соответствовать безызлучательным рекомбинационным переходам), что возможно является источником конечной неоднородности свечения в СД-экранах при минимальных градациях яркости.

Измерения импульсной электролюминесценции позволили подтвердить технический предел улучшения качества светодиодных экранов, а именно возможность уменьшения длительности нагрузок до 6 — 8 нс, при которых уже проявляется нелинейность зависимости интенсивности свечения светодиодов от времени свечения. Такая информация необходима, в первую очередь, производителям СД-экранов, поскольку величина контраста (соотношение «минимальная/максимальная яркость») выступает основным показателем качества экрана и, как следствие, влияет на его цену и конкурентоспособность.

Для повышения качества работы СД-экранов рекомендуется несколько сузить интервал допустимого разброса ВАХ при сортировке светодиодов для получения меньшего интервала разброса напряжения при рабочем токе. Такая допол-

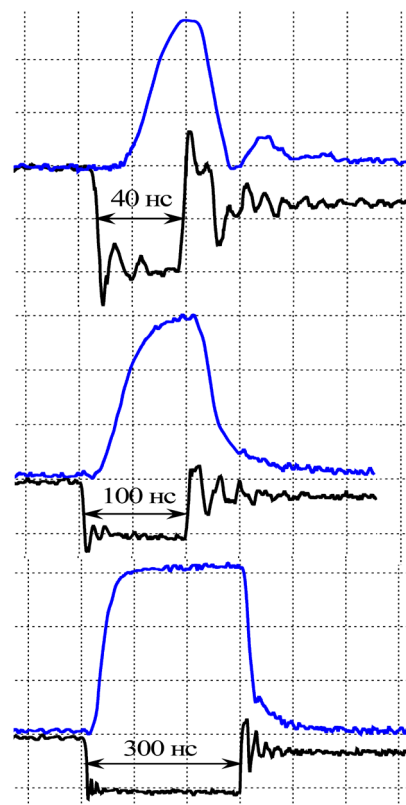


Рис. 5. Импульсы электролюминесценции и тока разной длительности для структур синего излучения RGB-СД

нительная сортировка СД, конечно же, снизит процент выбранных из общего числа светодиодов, но может улучшить качество передачи изображения за счет возможности использования более низких градаций яркости.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. LED Fine Pitch Display Possible Problems and Driver IC Solutions. Macroblock 2015 [<http://www.mblock.com.tw/support.php?Type=dl&KindID=3>]
2. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc5957.pdf>
3. III-Nitride Devices and Nanoengineering // Ed. by Z.C. Feng. — UK, London: Imperial College Press, 2008.
4. Lee S.W., Oh D.C., Goto H. et al. Origin of forward leakage current in GaN-based light-emitting devices // Appl. Phys. Lett. — 2006. — Vol. 89. — P. 132117(3). — <http://dx.doi.org/10.1063/1.2357930>.
5. Прудаев И.А., Гольгин И.Ю., Ширапов С.Б. и др. Влияние температуры на механизм инжекции носителей в светодиодах на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN // ФТП. — 2013. — Т. 47, вып. 10. — С. 1391—1395.
6. Sorokin V.M., Kudryk Ya.Ya., Shynkarenko V.V. Degradation processes in LED modules // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2016. — Vol. 19, N 3. — P. 248—254. — <http://dx.doi.org/10.15407/spqeo19.03.248>.
7. Pei Y., Zhu S., Yang H. et al. LED modulation characteristics in a visible-light communication system // Optics and Photonics Journal. — 2013. — N 3. — P. 139—142. — <http://dx.doi.org/10.4236/opj.2013.32B034>.

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.02 2017 г.

В. П. ВЕЛЕЩУК, О. І. ВЛАСЕНКО, З. К. ВЛАСЕНКО, В. В. ШИНКАРЕНКО,
Я. Я. КУДРИК, П. О. САЙ, В. В. БОРИЩ*

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ,
*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
E-mail: vvvit@ukr.net

ВПЛИВ РОЗКИДУ ЗНАЧЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ RGB-СВІТЛОДІОДІВ НА ОДНОРІДНІСТЬ СВІЩЕННЯ СВІТЛОДІОДНИХ ЕКРАНІВ ПРИ МІНІМАЛЬНІЙ ГРАДАЦІЇ ЯСКРАВОСТІ

Розглянуто проблеми неоднорідності свічення світлодіодних RGB-екранів при низьких, мінімальних градаціях яскравості, що спричинені неоднорідністю свічення світлодіодів. Встановлено, що найбільший розкид електричних параметрів окремих RGB-світлодіодів (FM-Z3535RGBW) мають структури синього кольору випромінювання $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$. Вивчено розкид електричних параметрів окремих структур RGB-світлодіодів. Підтверджено технічну межу покращення якості світлодіодних екранів – можливість зниження тривалості навантажень до 6–8 нс на світлодіод.

Ключові слова: RGB-світлодіод, електричні параметри, неоднорідність свічення, $\text{InGaN} / \text{GaN}$.

DOI: 10.15222/TKEA2017.3.30
UDC 621.383:621.381.2

V. P. VELESCHUK, O. I. VLASENKO,
Z. K. VLASENKO, V. V. SHYNKARENKO,
Ya. Ya. KUDRYK, P. O. SAI, V. V. BORSHCH*

Ukraine, Kyiv, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine;
*Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
E-mail: vvvit@ukr.net

INFLUENCE OF VARIATION OF ELECTRICAL PARAMETERS VALUES OF RGB LEDs ON THE RADIATION UNIFORMITY OF LED DISPLAYS AT MINIMAL LUMINOSITY GRADE

The emission uniformity of LED chips in the entire range of brightness and colors is the problem in LED displays manufacture process. It was approved that at lowering brightness gradations appearing the radiation nonuniformity between LED chips, and the higher disorders will be seen on the lesser emission levels. The RGB LED chips, observed by us, were based on AlGaInP (red), $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ (green), and $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ (blue) and had nominal working current 20 mA. Analysis of the current-voltage characteristics and capacitance-voltage characteristics showed the presence of inhomogeneous semiconductor junctions and ohmic contacts in blue LEDs structures that are the source of possible irregularities in the final emission of LED displays. The variation of voltages (at current 10 mA) were 2.81–2.98 V for blue structures, and 1.9–2.0 V for red ones. Some of the blue structures had additional parasite current-flow mechanism at low current. Rise time and fall time of electroluminescence pulse of blue structures were measured. The shortest LED pulse time in LED displays is limited by duration of 6–8 ns. The quality of LED displays may be improved by implementating the preliminary control of LED chips in a narrower range of voltage variation at operating currents, or more narrow interval of $I-V$ variation. This additional LEDs sorting will of course reduce the percentage of the total amount of light-emitting diodes, but may improve the image (video, photo) quality at translations by using a lower brightness gradations.

Key words: RGB LED, $I-V$ curves, InGaN/GaN .

REFERENCES

1. LED Fine Pitch Display Possible Problems and Driver IC Solutions. Macroblock 2015 [http://www.mblock.com.tw/support.php?Type=dl&KindID=3]
2. http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc5957.pdf
3. *III-Nitride Devices and Nanoengineering*. Ed. by Z.C. Feng. UK, London: Imperial College Press, 2008, 476 p.
4. Lee S.W., Oh D.C., Goto H., Ha J.S., Lee H.J., Hanada T., Cho M. W., Yao T., Hong S.K., Lee H.Y., Cho S.R., Choi J.W., Choi J.H., Jang J.H., Shin J.E., Lee J.S. Origin of forward leakage current in GaN-based light-emitting devices. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, p. 132117(3). http://dx.doi.org/10.1063/1.2357930.
5. Prudaev I.A., Golygin I.Yu., Shirapov S.B., Romanov I.S., Khludkov O.P. Tolbanov. Influence of temperature on the

mechanism of carrier injection in light-emitting diodes based on InGaN/GaN multiple quantum wells. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no 10, pp. 1382-1386. http://dx.doi.org/10.1134/S1063782613100230.

6. Sorokin V.M., Kudryk Ya.Ya., Shynkarenko V.V., Kudryk R.Ya., Sai P.O. Degradation processes in LED modules. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2016, vol. 19, no 3, pp. 248-254. http://dx.doi.org/10.15407/spqe019.03.248.

7. Pei Y., Zhu S., Yang H., Zhao L., Yi X., Wang J., Li J. LED modulation characteristics in a visible-light communication system. *Optics and Photonics Journal*, 2013, no 3, pp. 139-142. http://dx.doi.org/10.4236/opj.2013.32B034.

К. т. н. В. Е. ТРОФИМОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: vovic@ukr.net

ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩАЯ ПАНЕЛЬ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ МИКРОКЛИМАТА В ПОМЕЩЕНИИ С РАДИОЭЛЕКТРОННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Для поддержания микроклимата в помещениях с радиоэлектронным оборудованием, расположенных в труднодоступных регионах, предлагается для минимизации энергозатрат использовать теплоаккумулирующую панель, в которой происходит фазовый переход твердого рабочего вещества в жидкое под воздействием солнечного излучения. Приведены результаты оценки работоспособности такого устройства, характеристики и рекомендации по применению.

Ключевые слова: радиоэлектронное оборудование, микроклимат, аккумулятор солнечной энергии, плавящиеся вещества.

В ряде случаев функционирование радиоэлектронного оборудования (**РЭО**) происходит в помещениях, расположенных в труднодоступных регионах с климатическими условиями, которые характеризуются существенными колебаниями температуры воздуха как в течение суток (от резко отрицательной ночью до резко положительной днем), так и между солнечной и теневой сторонами помещения. Для компенсации этих колебаний используются разнообразные устройства термостатирования и обеспечения микроклимата [1]. Их общим свойством является необходимость потребления электрической энергии, количество которой в указанных условиях достаточно ограничено, и ее расход направлен, прежде всего, на обеспечение работоспособности самого РЭО, а также на поддержание минимального уровня жизнедеятельности обслуживающего персонала. Для таких случаев перспективным решением является использование устройств, не требующих электрической энергии для своего функционирования.

В настоящей статье описана разработанная теплоаккумулирующая панель, принцип действия которой основан на поглощении и сохранении на некоторое время тепловой энергии при фазовом переходе твердого рабочего вещества в жидкое под воздействием, например, солнечного излучения [2, 3], предназначенная для компенсации потерь тепла из помещения с РЭО в ночное время суток.

Теплоаккумулирующая панель (**ТП**) представляет собой оболочку в форме, например, параллелепипеда, выполненную из материала

с высокой теплопроводностью, такого как сплавы алюминия (**рис. 1**). Ее внутренний объем заполнен рабочим веществом с низкой температурой плавления, например парафином. Наружная поверхность оболочки имеет покрытие с коэффициентом поглощения солнечного излучения, близким к единице. Оболочка закрепляется на штативе с колесами (роликами) и поворотным устройством, позволяющем изменять ориентацию оболочки относительно горизонта.

В дневное время суток ТП перемещается обслуживающим персоналом в специально оборудованный солярий с достаточной площадью остекления, где происходит ее нагрев до температуры, превышающей температуру плавления рабочего вещества, и аккумуляция тепловой энергии. Для достижения максимальной эффек-

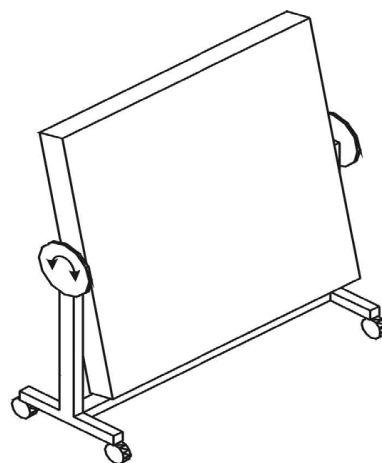


Рис. 1. Общий вид теплоаккумулирующей панели

тивности время нахождения ТП под воздействием солнечного излучения должно быть не меньше времени полного перехода рабочего вещества из твердой фазы в жидкую. В ночное время суток ТП перемещается из солярия в помещение с РЭО, в котором она путем естественной конвекции отдает накопленную тепловую энергию, компенсируя потери тепла в окружающую среду.

Для определения работоспособности такой ТП необходимо определить ее объем и массу, время аккумуляции тепловой (солнечной) энергии, время отдачи тепловой энергии в помещении, а также температуру оболочки при воздействии прямых солнечных лучей. Такая оценка проводилась для нескольких форм-факторов ТП, однако здесь приведем только заслуживающие внимания результаты.

Расчет проведем для ТП, размеры которой соответствуют размерам стандартного радиатора центрального водяного отопления малогабаритного жилого помещения, а именно: длина $L = 1,063$ м; высота $H = 1,063$ м; толщина $B = 0,1$ м. При вычислениях будем пренебрегать толщиной, теплопроводностью и теплоемкостью оболочки.

Рабочее вещество — парафин со следующими теплофизическими свойствами [4]:

- удельная теплота плавления
 $r = 156 \cdot 10^3$ Дж/кг;
- температура плавления $T_{\text{п}} = 40^\circ\text{C}$;
- удельная теплоемкость
 $C_{\text{уд}} = 2680$ Дж/(кг·°C);
- теплопроводность жидкой фазы
 $\lambda_1 = 0,27$ Вт/(м·°C);
- плотность твердой фазы $\rho_2 = 780$ кг/м³.

Определим объем $V_{\text{ТП}}$ и массу $M_{\text{ТП}}$ ТП:

$$V_{\text{ТП}} = L \cdot H \cdot B = 1,063 \cdot 1,063 \cdot 0,1 = 0,113 \text{ м}^3;$$

$$M_{\text{ТП}} = \rho_2 V_{\text{ТП}} = 780 \cdot 0,113 = 88,14 \text{ кг}.$$

Отметим, что масса ТП такова, что один человек без значительных усилий может перемещать ее на штативе с колесиками по полу.

Время аккумуляции ТП тепловой энергии (время «заряда») оценим через время полного плавления рабочего вещества $\tau_{\text{пл}}$, которое в соответствии с [4] вычисляется как

$$\tau_{\text{пл}} = \frac{r \cdot \rho_2}{\lambda_1 (T_0 - T_{\text{п}})} \cdot \frac{7}{24} \cdot R^2, \quad (1)$$

где T_0 — среднеинтегральная температура поверхности оболочки, °C;

R — радиус сферы, эквивалентной по объему ТП, м.

Найдем радиус эквивалентной сферы при полученном значении объема:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V_{\text{ТП}}}{4\pi}} = 0,34 \text{ м}.$$

В соответствии с формулой (1) при указанных значениях входящих в нее параметров и температуре $T_0 = 41^\circ\text{C}$, превышающей температуру плавления рабочего вещества всего на 1°C , время полного плавления рабочего вещества составит $\tau_{\text{пл}} = 15195 \text{ с} = 4,2 \text{ ч}$, а при $T_0 = 42^\circ\text{C}$ значение $\tau_{\text{пл}}$ будет в два раза меньше.

Таким образом, при среднеинтегральной температуре оболочки $41 - 42^\circ\text{C}$ время «заряда» ТП составляет $2,1 - 4,2 \text{ ч}$.

Время отдачи ТП тепловой энергии (время «разряда») в помещении с РЭО оценим как половину времени полного затвердевания рабочего вещества $\tau_{\text{затв}}$, которое в соответствии с [4] вычисляется как

$$\tau_{\text{затв}} = R_0 \left(C_{\text{п}} \cdot \ln \frac{T_{\text{п}}}{(T_{\text{п}} - T_{\text{н}})} + \frac{M_{\text{ТП}} r}{(T_{\text{п}} - T_{\text{н}})} \right), \quad (2)$$

где R_0 — тепловое сопротивление между ТП и воздухом в помещении с РЭО, °C/Вт;

$C_{\text{п}}$ — полная теплоемкость ТП, Дж/°C;

$T_{\text{н}}$ — среднеинтегральная температура воздуха в помещении с РЭО, °C.

При теплопередаче естественной конвекцией тепловое сопротивление равно

$$R_0 = 1/(\alpha S),$$

где α — коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности оболочки ТП, Вт/(м²·°C);

S — площадь теплоотдающей поверхности ТП, м².

Для оценочных расчетов примем α равным $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [5].

Пренебрегая теплоотдачей поверхности ТП, обращенной к полу, для S получим

$$S = 0,1 \cdot 1,063 + 2 (0,1 + 1,063) \cdot 1,063 = 2,579 \text{ м}^2.$$

Теперь можем рассчитать тепловое сопротивление и полную теплоемкость ТП без учета теплоемкости оболочки и получим

$$R_0 = 0,039^\circ\text{C}/\text{Вт};$$

$$C_{\text{п}} = C_{\text{уд}} M_{\text{ТП}} = 236215,2 \text{ Дж}/^\circ\text{C}.$$

В соответствии с формулой (2) при указанных значениях входящих в нее параметров и температуре $T_{\text{н}} = 20^\circ\text{C}$ время полного затвердевания рабочего вещества составит $\tau_{\text{затв}} = 33197,7 \text{ с} = 9,2 \text{ ч}$, и тогда время «разряда» ТП будет равно $\tau_{\text{разр}} = 0,5 \tau_{\text{затв}} = 4,6 \text{ ч}$. При $T_{\text{н}} = 25^\circ\text{C}$ получим $\tau_{\text{затв}} = 44785,4 \text{ с} = 12,4 \text{ ч}$, $\tau_{\text{разр}} = 6,2 \text{ ч}$.

Таким образом, при температуре воздуха в помещении с РЭО 20–25°C ТП может отдавать тепло в течение 4,6–6,2 ч.

Температуру оболочки ТП (в градусах Кельвина), которая достигается при воздействии на нее потока солнечной радиации $Q_{\text{луч}}$, можем найти из закона Стефана — Больцмана

$$Q_{\text{луч}} = \epsilon \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot T_0^4, \quad (3)$$

где ϵ — степень черноты наружной поверхности оболочки. Примем $\epsilon = 0,98$, что соответствует использованию лакокрасочного покрытия [5].

Для оценки $Q_{\text{луч}}$ воспользуемся приведенной в [5] методикой расчета максимального потока солнечной радиации, падающего на поверхность, расположенную на заданной географической широте с заданным углом наклона к горизонту в зимнее и в летнее время года.

Рассмотрим два варианта взаимодействия ТП с солнечной радиацией — более благоприятный и менее. Параметры для проведения оценки и ее результаты приведены в таблице, где I — среднемесячный поток солнечного излучения, падающий на единицу поверхности, T_0 — получена из формулы (3).

Условия расположения ТП: месяц/географическая широта/угол наклона к горизонту	I , кДж/ (м ² ·сут) [5]	$Q_{\text{луч}} = I \cdot S$		T_0 , °C
		кДж/ (м ² ·сут)	Вт	
Июнь/45° северной широты/7°	24176	62350	722	64,5
Февраль/60° северной широты/60°	22198	57249	663	57,4

Как видно из полученных результатов, даже в условиях, соответствующих худшему варианту взаимодействия ТП с солнечной радиацией, при исключении воздействия ветра обеспечивается нагрев оболочки ТП до температуры суще-

ственно более высокой, чем температура рабочего вещества.

Заключение

Приведенные оценочные расчеты показывают принципиальную работоспособность теплоаккумулирующей панели и целесообразность проведения более точных исследований с учетом временных суточных колебаний температуры воздуха в помещении с РЭО, температуры наружного воздуха и потока полного солнечного излучения.

Преимуществами предложенного решения являются простота конструкции, отсутствие затрат электроэнергии, а также близкие к нулю эксплуатационные затраты (перемещение, поворачивание, удаление пыли). К недостаткам следует отнести необходимость наличия помещения с большой площадью остекления стеклами с высоким коэффициентом пропускания падающего солнечного излучения, а также от 2,5 до 4,5 часов солнечной погоды в течение дня.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Цигберхман М. И., Фромберг Э. М., Грабой Л. П. Термостатирование в технике связи. — Москва: Связь, 1979.
2. Исмаилов Т. А., Евдулов О. В., Евдулов Д. В., Габитов И. А. Математическая модель системы охлаждения элементов РЭА, основанной на использовании плавящихся теплоаккумуляторов с дополнительным воздушным теплоотводом // Вестник МАХ. — 2015. — № 2. — С. 50–54.
3. Jankowski N.R., McCluskey P. A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering // Applied Energy. — 2014. — N 113. — P. 1525–1561.
4. Алексеев В. А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. — Москва: Энергия, 1975.
5. Спокойный Ю. Е., Трофимов В. Е., Гидалевич В. Б. Тепломассообмен в РЭА: Сборник задач. — Киев, Одесса: Лыбидь, 1991.

Дата поступления рукописи
в редакцию 16.03 2017 г.

В. Є. ТРОФІМОВ

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: vovic@ukr.net

ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧА ПАНЕЛЬ ДЛЯ ПІДТРИМКИ МІКРОКЛІМАТУ В ПРИМІЩЕННІ З РАДІОЕЛЕКТРОННИМ ОБЛАДНАННЯМ

Для підтримки мікроклімату в приміщеннях з радіоелектронним обладнанням, розташованих у важкодоступних регіонах, пропонується для мінімізації енерговитрат використовувати теплоаккумулюючу панель, в якій відбувається фазовий перехід твердої робочої речовини в рідку під впливом сонячного випромінювання. Наведено результати оцінки працездатності такого пристрою, характеристики і рекомендації щодо застосування.

Ключові слова: радіоелектронне обладнання, мікроклімат, акумулятор сонячної енергії, плавка речовина.

THERMAL-ACCUMULATING PANEL FOR MICROCLIMATE SUPPORT
IN A ROOM WITH RADIOELECTRONIC EQUIPMENT

In a number of applications the functioning of radio electronic equipment (REO) occurs in rooms located in hard-to-reach regions with climatic conditions that are characterized by significant air temperature fluctuations reaching tens of Celsius degrees. To compensate these fluctuations various microclimate control devices are used. Their common property is necessity to consume electric energy, amount of which in the specified conditions is sufficiently limited. In this regard, the actual task is to minimize energy costs to provide the microclimate REO, for example, by using devices that do not require electrical energy for their operation.

One of the opportunities for solving this problem is using of a thermal-accumulating panel (TAP). It is designed to compensate heat losses from the room with REO at night. The principle of the TAP is based on the absorption and conservation of thermal energy for a period of time during the phase transition of a solid working substance into liquid influenced, for example, by solar radiation.

The construction of such TAP is considered here. Assessments of its operability, characteristics and recommendations for use are given. It is shown that at air temperature of 20 ... 25 °C TAP can heat the room for at least 4.6 ... 6.2 hours at 2.5 ... 4.5 hours of sunny weather during daylight hours.

Keywords: radio electronic equipment, microclimate, solar energy accumulator, melting substances

REFERENCES

1. Tsigberkhman M. I., Fromberg E. M., Graboi L. P. *Termostatirovanie v tekhnike svyazi*. [Thermostating in communication technology]. Moscow, Svyaz', 1979. (Rus)
2. Ismailov T. A., Evdulov O. V., Evdulov D. V., Gabitov I. A. [Mathematical model of the cooling system for REA elements based on the use of melting heat accumulators with additional air heat sink]. *Vestnik MAKh*, 2015, no 2, pp. 50 – 54. (Rus)

3. Jankowski N.R., McCluskey P. A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering. *Applied Energy*, 2014, no 113, pp. 1525 – 1561.

4. Alekseev V. A. *Okhlazhdenie radioelektronnoi apparatury s ispol'zovaniem plavyashchikhsya veshchestv*. [Cooling of electronic equipment using melting substances]. Moscow, Energiya, 1975. (Rus)

5. Spokoyniy Yu. E., Trofimov V. E., Gidalevich V. B. *Teplomassoobmen v REA: Sbornik zadach*. [Heat and mass transfer in REA: Collection of tasks]. Kyiv, Odessa, Lybid', 1991. (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 2. Каскадные устройства: монография. — Одесса: Политехперіодика, 2016. — 124 с.

Книга посвящена прогнозированию показателей надежности каскадных термоэлектрических устройств (КТЭУ) при их проектировании и оценке показателей надежности КТЭУ выбранной конструкции.

Рассмотрены функциональные зависимости, позволяющие оценить как охлаждающие возможности, так и энергетическую эффективность и показатели надежности проектируемого устройства в различных токовых режимах работы. Продемонстрирован подход, позволяющий перейти от расчетов к построению каскадных ТЭУ на основе унифицированных модулей, и подход, который позволяет оценить показатели надежности КТЭУ заданной конструкции. Проанализировано влияние тепловой нагрузки на параметры надежности КТЭУ. Приведены алгоритмы, которые помогут разработчику вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием КТЭУ или выбрать оптимальную для поставленной задачи конструкцию КТЭУ.

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



А. В. СЕМЕНОВ^{1,2}, А. В. ЛОПИН¹, В. Н. БОРИСКИН³Украина, г. Харьков, ¹Институт монокристаллов НАНУ, ²НТУ «Харьковский политехнический институт», ³ИНЦ «Харьковский физико-технический институт» НАНУ

E-mail: savladi@ukr.net

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО SiC НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛА Al₂O₃

Исследована радиационная стойкость пленок нанокристаллического карбида кремния nc-SiC на подложке из монокристалла сапфира в условиях облучения высокоэнергетическими (10 МэВ) электронами в диапазоне флюенса $5 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{20}$ см⁻². Установлено, что радиационные изменения в пленках nc-SiC в первую очередь проявляются в УФ-области спектра поглощения, обусловленной межзонными переходами. Показано, что вслед за начальной разупорядоченностью пленок nc-SiC, полученной при флюенсе $5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{16}$ см⁻², происходит упорядочение структуры при дозах облучения $(1 - 5) \cdot 10^{17}$ см⁻². Установлено, что начало отжига дефектов в облученных пленках наблюдается уже при 200°C. Существенные изменения оптических свойств в сапфире начинаются при флюенсе $5 \cdot 10^{17}$ см⁻², что следует учитывать при использовании этих материалов для оптоэлектронных приборов в условиях интенсивных радиационных воздействий.

Ключевые слова: нанокристаллические пленки SiC, монокристаллы Al₂O₃, спектры поглощения, облучение электронами, радиационные дефекты, радиационное упорядочение, отжиг дефектов.

Одним из первоочередных требований к перспективным электронным приборам является повышение их стойкости к интенсивным радиационным воздействиям. В связи с этим, внимание разработчиков обращено к нанокристаллическим полупроводниковым материалам, обладающим исключительно высокими порогами радиационных деградации и аморфизации по сравнению с монокристаллами [1–3]. Это обусловлено высокой концентрацией интерфейсных областей в виде границ нанокристаллов, которые могут выступать в качестве поглотителей точечных дефектов и обеспечивать ускорение их рекомбинации [4, 5]. Материалы на основе нанокристаллического карбида кремния nc-SiC привлекают особое внимание в связи с комплексом уникальных свойств SiC, таких как высокие значения пороговой энергии дефектообразования (25–35 эВ) [6, 7], высокотемпературная стабильность, химическая инертность и отличные механические свойства [8, 9]. Кроме фундаментальных свойств слоя nc-SiC, полученные прямым ионным осаждением [10], обладают рядом свойств, связанных с такими квантовыми эффектами в нанокристаллах, как аномально высокая нелинейно оптическая восприимчивость [11, 12], коллективные магнитные свойства [13], многоступенчатая межкристаллитная туннельная проводимость [14]. Эти свойства обуславливают перспективы широкого применения пленок во многих областях микроэлектроники, оптоэлектроники,

квантовой электроники в условиях внешних жестких воздействий.

Исследования влияния облучения пленок nc-SiC высокоэнергетическими (10 МэВ) электронами, выполненные ранее в [15], показали высокую радиационную стойкость материала и немонотонную зависимость свойств от флюенса облучения. При этом было установлено, что более слабым звеном в радиационной стабильности оптических свойств системы «nc-SiC-пленка + подложка Al₂O₃» является подложка: несмотря на то, что монокристалл Al₂O₃ является одним из наиболее радиационно стойких кристаллических материалов, сапфировая подложка проявила более высокую зависимость изменения оптической плотности от флюенса облучения по сравнению с nc-SiC пленками. Поэтому в настоящей работе более детально исследовано влияние высокоэнергетического (10 МэВ) электронного облучения и восстанавливающего отжига на оптические свойства системы, состоящей из пленки nc-SiC произвольного ромбоэдрического поли типа и подложки Al₂O₃.

Экспериментальные образцы и методика измерений

Проводилось облучение электронами с энергией 10 МэВ нанокристаллических пленок карбида кремния толщиной 1,2 мкм, осажденных на подложки из сапфира методом прямого ионного осаждения [10]. В исследуемых пленках со-

держание кристаллической фазы SiC (преимущественно кристаллитов поли типа 21R размером 4–5 нм) составляло 80% [16].

Образцы пленок *nc*-SiC на подложках из сапфира поэтапно облучали на ускорителе электронов КУТ [17] сканирующим импульсным пучком электронов со следующими параметрами:

- частота сканирования пучка 3 Гц;
- количество импульсов в секунду 200;
- длительность импульса 3,6 мкс;
- амплитуда импульса тока 0,5 А;
- энергия электронов 10 МэВ.

Небольшая толщина пленок и подложек (0,5 мм) и высокая энергия облучающих электронов обеспечивали полный пролет электронов через пленки и подложки. Одни и те же образцы облучали поэтапно тринадцать раз с нарастающим флюенсом F_i (см. табл. 1). Оптические свойства пленок измеряли после каждого облучения.

Для определения температуры отжига радиационных дефектов после набора образцами флюенса $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ часть образцов была ступенчато отожжена в вакууме в температурном диапазоне 200–1200 °С.

Для определения изменений оптических свойств пленок *nc*-SiC в системе «пленка — подложка» отдельно измеряли оптические характеристики чистого сапфира при тех же условиях облучения.

Оптические параметры пленок и подложек изучали спектрофотометрическими методами с использованием современных методик обработки спектров. Спектральные измерения проводились на спектрофотометре Lambda 35 фирмы Perkin Elmer в диапазоне 190–1100 нм.

Измеряли коэффициенты пропускания и отражения (в том числе и диффузного) пленок *nc*-SiC на подложке. Из спектров отражения вычисляли толщину пленки SiC d и ее показатель преломления n [18]. Из спектров пропускания вычисляли оптическую плотность, коэффициент поглощения и дифференциальную оптическую плотность

$$\Delta D = D_i(\lambda) - D_0(\lambda) = \lg [T_i(\lambda) / T_0(\lambda)], \quad (1)$$

где $D_0(\lambda)$, $D_i(\lambda)$ и $T_0(\lambda)$, $T_i(\lambda)$ — соответственно, оптическая плотность и коэффициент пропускания образца в исходном состоянии и после i -го флюенса (либо отжига) на длине волны λ .

Для того чтобы проанализировать спектр поглощения в пленках *nc*-SiC, из спектров исходных пленок на подложках вычитали поглощение и отражение в подложках Al_2O_3 .

Исследование оптических параметров пленки *nc*-SiC

На рис. 1 представлены спектры пропускания, оптической плотности и отражения исходных образцов и после каждого этапа облучения.

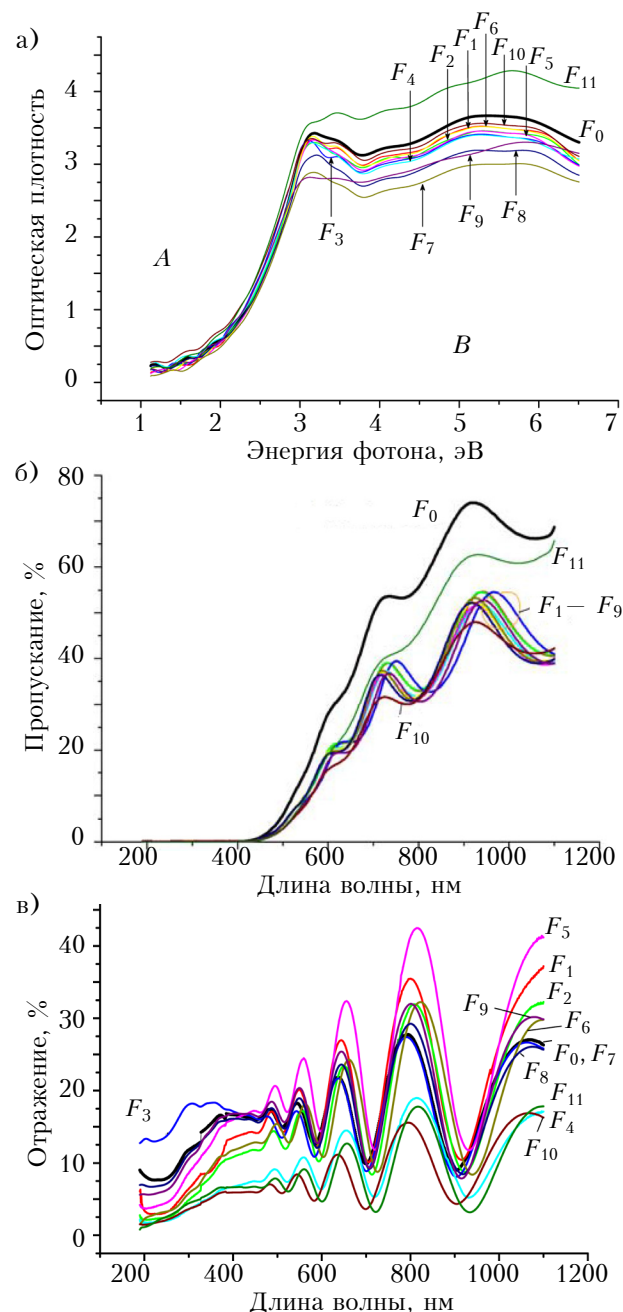


Рис. 1. Спектры оптической плотности (а), пропускания (б) и отражения (в) исходной *nc*-SiC-пленки на подложке из Al_2O_3 (F_0) и после облучения различным флюенсом электронов

Таблица 1

Величина флюенсов, которыми поэтапно облучали исследуемые образцы (в см^{-2})

F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}
$5 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$	$9 \cdot 10^{18}$	$1,23 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{19}$	$9 \cdot 10^{19}$

Приведенные на рис. 1, а спектры отражают структурно чувствительные зависимости максимумов оптической плотности (ОП) от флюенса облучения. Выполненный нами ранее [15] детальный анализ таких зависимостей поглощения облученных пленок при энергиях фотонов ниже и выше края фундаментального поглощения позволяет сделать вывод, что накопление радиационных дефектов в граничных разупорядоченных областях пленок нанокристаллического SiC происходит медленнее, чем в кристаллической фазе SiC. Такое заключение хорошо согласуется с общей моделью радиационной устойчивости нанокристаллических материалов.

Из спектров пропускания на рис. 1, б видно, что положение края фундаментальной полосы поглощения зависит от уровня флюенсов электронного облучения, а прозрачность облученных пленок уменьшается во всем спектральном диапазоне, при этом наблюдается некоторое насыщение от флюенса. Из рисунка также видно, что угол наклона краевого участка кривой пропускания уменьшается с увеличением электронных флюенсов, что указывает на изменение границы запрещенной зоны. В то же время, значительная величина пропускания облученных с максимальным флюенсом образцов в длинноволновой области (около 700 нм) основной полосы поглощения (более 40%) и четкая интерференционная картина свидетельствуют о сохранении структурного совершенства нанокристаллической фазы в пленках, прозрачность которых чувствительна к изменению коэффициента поглощения.

Для однозначного определения параметров энергетической структуры полупроводника было проанализировано поглощение и определена ширина запрещенной зоны. В общем виде взаимосвязь между шириной запрещенной зоны E_g , коэффициентом поглощения α и частотой излучения ν может быть представлена выражением [19]

$$d(\ln(\alpha E))/dE = m/(E - E_g), \quad (2)$$

где m — коэффициент, отражающий природу оптических переходов. Для непрямых разрешенных переходов в карбиде кремния $m = 2$ [18].

Экстремумы этой функции указывают на значения энергии оптических переходов, соответствующие зонной структуре исследуемой пленки [19], поэтому спектры поглощения были перестроены в координатах $d(\ln(\alpha E))/dE$ и E — см. **рис. 2**. В этом случае оценку величины запрещенной зоны в общем виде проводили по положению максимума спектра поглощения, т. е. по положению пика, соответствующего переходу электрона в зону проводимости. Наличие нескольких максимумов на полученных графиках

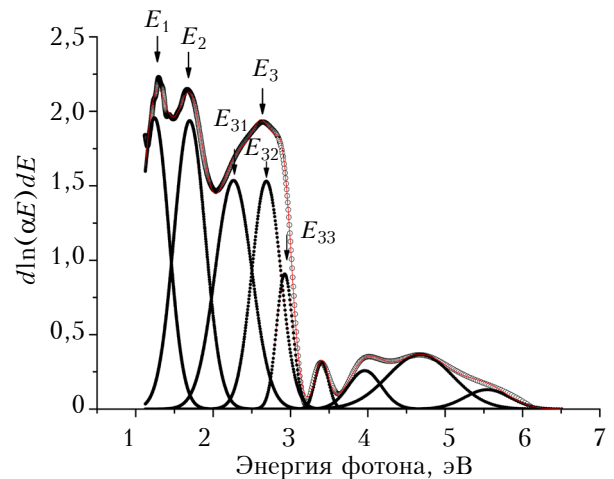


Рис. 2. Зависимость $d(\ln(\alpha E))/dE$ от энергии фотона, полученная из спектров на рис. 1, а

свидетельствует о присутствии нескольких переходов в энергетическом спектре нанокристаллической системы. Из приведенных на рис. 1, а спектров ОП видно, что пленка имеет сложную структуру края собственного поглощения. Характерными особенностями и отличиями спектров поглощения пленок *nc*-SiC является протяженность спектров в длинноволновую область с перекрытием запрещенных зон соответствующих политипов. Согласно [19] наличие максимумов на графиках рис. 2 соответствует переходу электрона в зону проводимости.

Оптические переходы E_1 и E_2 соответствуют непрямым разрешенным переходам, характеризующим длинноволновой хвост, связанный с появлением дополнительного поглощения как дефектами в запрещенной зоне SiC, так и материалом граничных межкристаллитных областей. Оптический переход E_3 характеризует оптическую ширину запрещенной зоны. Поскольку этот пик значительно уширен, он был аппроксимирован тремя гауссианами с энергиями $E_{31} = 2,35$ эВ, $E_{32} = 2,67$ эВ и $E_{33} = 2,89$ эВ, которые близки к энергиям запрещенных зон в SiC кубического и ромбоэдрического политипа [20]. Усредненное значение энергии прямого перехода составляет $E = 2,63$ эВ, что совпадает с измерениями в координатах $(\alpha E)_2$ и E .

Для количественного определения характеристик пленки в окрестности границы фундаментального поглощения используем выражение для коэффициента поглощения в этой области при $h\nu < E_g$ в виде [21, 22]

$$\alpha(h\nu) = B \cdot \Delta E_0^{3/2} \cdot \exp(h\nu / \Delta E_0). \quad (3)$$

Здесь предэкспонента ΔE_0 — эмпирический параметр, имеющий размерность энергии и описывающий ширину полосы локализованных со-

стояний в энергетической щели, который отражает влияние различных дефектов, приводящих к размытию границы полосы. Показатель степени $3/2$ учитывает прямые запрещенные переходы, для непрямозонных полупроводников (при непрямых запрещенных переходах) он будет равен 3 [23].

Входящий в выражение (3) коэффициент B пропорционален концентрации включений и дефектов, образованных в пленке, и определяет наклон краевого участка фундаментальной полосы поглощения.

С помощью этой формулы было оценено изменение концентрации дефектов в пленке nc -SiC в зависимости от электронных флюенсов, которое иллюстрируется рис. 1, а. В соответствии с данными структурного анализа [16, 24] модель пленки SiC представляется в виде совокупности нанокристаллов различного типа: преимущественно ромбоэдрического политипа 21R-SiC, других сопутствующих политипов (например, кубического 3C-SiC с размерами кристаллов от 4 до 6 нм), нанокристаллов кремния и межграницной областью, содержащей разупорядоченные фазы карбида кремния и оксидов, таких как SiO_x .

На кривых рис. 1, а можно выделить две области оптического поглощения. Область A находится в области энергий фотонов $E < E_g$, она обусловлена переходами, непосредственно включающими дефектные состояния. В области B ($E > E_g$) оптическое поглощение связано с переходами в полностью координированной системе, до некоторой степени возмущенной дефектами. Край поглощения, соединяющий две эти области, является сложным. При низких энергиях фотонов появляется хвост, обусловленный дефектами. Оптическая плотность экспоненциально зависит от энергии фотона при небольших значениях E , а при более высоких изменяется по степенному закону.

Поскольку при облучении электронами с энергией 10 МэВ генерируются точечные радиационные дефекты (междоузельные атомы, ва-

кансии и их комплексы), в спектрах оптической плотности облученных пленок должны наблюдаться соответствующие изменения. Для количественного описания этих изменений краевые участки спектральных кривых были аппроксимированы функцией (3) — из значений ОП вычислены и затем аппроксимированы коэффициенты поглощения ($h\nu$).

Из табл. 2 видно, что при последовательном облучении пленок нанокристаллического карбида кремния происходит рост параметров аппроксимации B и ΔE_0 вплоть до флюенса F_4 , уменьшение до минимума (F_6), а затем постепенное увеличение в 1,2 — 1,7 раза. Увеличение B и ΔE_0 отражает не только уширение полосы локализованных состояний в энергетической щели, связанное с увеличением концентрации различных дефектов, но и существенное изменение наклона края полосы поглощения.

При больших концентрациях дефектов кривая оптической плотности становится более пологой и протяженной в длинноволновую область видимого участка спектра, что приводит к известным затруднениям при определении величины оптической щели. В первом приближении оценить влияние дефектной составляющей пленок на спектры поглощения можно путем взаимного вычитания спектров оптической плотности пленок nc -SiC, полученных при различных флюенсах.

На рис. 3 показаны спектры дифференциальной ОП пленок nc -SiC, полученные относительно спектров ОП исходных образцов. Из рисунка видно, что вначале происходит существенный рост поглощения в так называемом хвосте, уходящем в запрещенную зону, благодаря возникновению в запрещенной зоне новых дефектов. Затем начинает происходить радиационный отжиг дефектов и при шестом флюенсе разностный спектр поглощения стремится к нулю. Эти результаты согласуются и дополняют данные о радиационном отжиге дефектов в пленке nc -SiC при флюенсе 10^{16} см^{-2} , представленные в [15].

Таблица 2

Параметры аппроксимации представленных на рис. 3 спектров оптической плотности пленок nc -SiC при различных флюенсах

Флюэнс	F_0	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
$B, \text{ см}^{-1}\text{эВ}^{3/2}$	0,038	0,0537	0,058	0,061	0,058	0,0573
$\Delta E_0, \text{ эВ}$	0,566	0,6255	0,6309	0,6351	0,6344	0,633
Флюэнс	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}
$B, \text{ см}^{-1}\text{эВ}^{3/2}$	0,0533	0,0613	0,062	0,065	0,0672	0,0658
$\Delta E_0, \text{ эВ}$	0,629	0,6487	0,6634	0,668	0,6758	0,6549

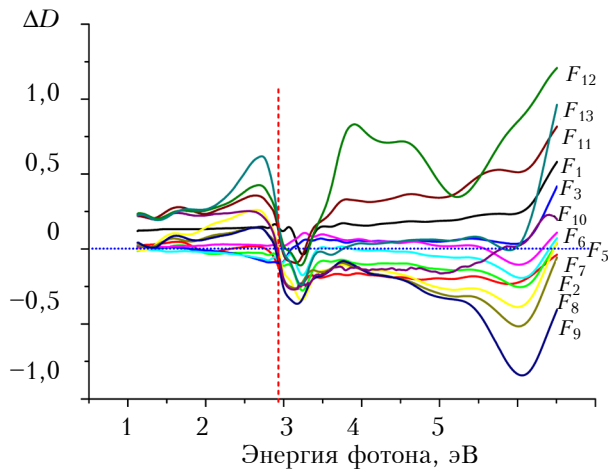


Рис. 3. Спектры дифференциальной оптической плотности облученных различными флюенсами пленок *nc*-SiC, полученные относительно исходных образцов

В [25] было показано, что при толщине пленок *nc*-SiC от 1 до 2 мкм наблюдается устойчивая интерференция, особенно четко наблюдаемая в спектре отражения при $\lambda > 500$ нм. Используя результаты измерения коэффициента отражения после проведенного облучения (рис. 1, в), были рассчитаны показатель преломления и коэффициент экстинкции пленки в диапазоне $\lambda = 788 - 818$ нм. Именно в этой области происходят смещения интерференционного максимума с порядком интерференции $N = 8$, а следовательно, оптической толщины $\delta = nd$. Значит,

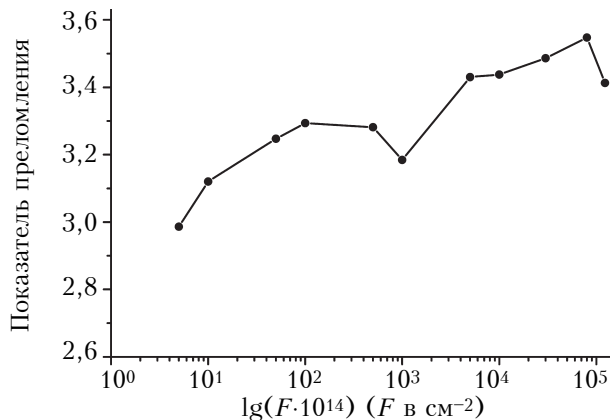


Рис. 4. Зависимость показателя преломления пленки *nc*-SiC от флюенса при поэтапном облучении

поскольку флюенсы электронного облучения не влияют на геометрическую толщину пленки, изменяется показатель преломления пленки.

Если проанализировать приведенную на рис. 4 зависимость, рассчитанную из спектров отражения по интерференционной кривой, можно говорить о корреляции этой зависимости с вышеприведенными данными. Из графика видно, что по мере увеличения флюенса облучения происходит усиление разупорядоченности структуры в пленках SiC и рост показателя преломления от 2,8816 до 3,2805, достигающего максимума при флюенсах $5 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$. Далее, при флюенсе $1 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$ происходит радиационное упорядочение, обусловленное уменьшением концентрации радиационных дефектов за счет их аннигиляции. После этого зависимость показателя преломления от дозы облучения электронами проходит через минимум, указывая тем самым на некоторое структурное упорядочение. Все измеренные оптические величины подтверждают радиационное упорядочение при дозах облучения $1 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$.

На рис. 5 представлены спектры ОП пленок *nc*-SiC, облученных флюенсом $F_{11} = 1,23 \cdot 10^{19}$ см $^{-2}$ и отожженных при различной температуре, а в табл. 3 – параметры аппроксимации, полученные при обработке спектров с помощью формулы (3).

На рис. 5 видно, что с повышением температуры отжига оптическая плотность пленки

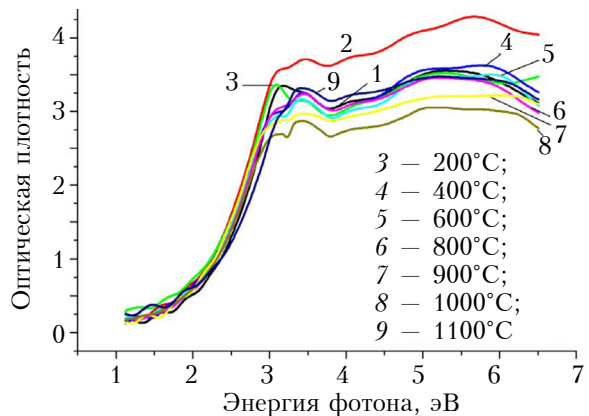


Рис. 5. Спектры ОП исходных пленок (1) и облученных флюенсом F_{11} до отжига (2) и отожженных в вакууме при различных температурах (3–9)

Таблица 3

Параметры аппроксимации представленных на рис. 3 спектров ОП пленок *nc*-SiC (кривые 2–9)

Температура отжига, °C	—	200	400	600	800	900	1000	1100
B , см $^{-1}$ ·эВ $^{3/2}$	0,065	0,059	0,0551	0,053	0,052	0,048	0,041	0,04
ΔE_0 , эВ	0,6549	0,661	0,6435	0,6373	0,6289	0,6244	0,5851	0,5846

уменьшается немонотонно. После первого отжига при температуре 200°C наблюдается значительное уменьшение поглощения, связанное, видимо, с отжигом дефектов на основе вакансий углерода, имеющих наименьшую энергию активации диффузии. Затем при общей тенденции к уменьшению оптической плотности наблюдаются ее колебания в другую сторону при температуре отжига 800°C.

При температуре отжига 1100°C ОП обработанной пленки практически совпадает с ОП исходной пленки. Эти данные хорошо коррелируют со значениями параметров B и ΔE_0 , представленными в табл. 3. Уже при 200°C начинаются изменения в облученных пленках, что свидетельствует о больших концентрациях вакансий с малой энергией активации диффузии. Из литературы известно, что такими радиационными дефектами в карбиде кремния являются вакансии углерода V_c , которые начинают отжигаться при 200°C [26].

Линейно уменьшаясь при уменьшении температуры отжига в диапазоне 200–1200°C, значения B и ΔE_0 достигают минимума, т. е. достигается максимальное упорядочение структуры пленки при температуре 1100–1200°C. Таким образом, существенных деградационных ее изменений не наблюдается, в отличие от сапфира, оптические свойства которого начинают существенно изменяться уже при флюенсе $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Исследование оптической плотности подложки Al_2O_3

Дополнительно было проведено исследование радиационной стойкости сапфира, поскольку изменение его оптических свойств влияет на результаты измерений спектральных зависимостей коэффициентов пропускания и отражения системы «пленка — подложка».

Известно, что Al_2O_3 устойчив к ионизирующим излучениям, а существенная перестройка дефектной структуры и изменения его электрофизических свойств наблюдается лишь при облучении высокоэнергетическими частицами, которые вызывают прямые смещения атомов [27]. Такое облучение приводит к появлению серии центров окраски, ответственных за многочисленные полосы анизотропного поглощения и люминесценции в ультрафиолетовой и видимой областях спектра [28]. Поэтому необходимо знать степень деградации чистой сапфировой подложки для последующего корректного учета изменений оптических свойств при электронном облучении самой пленки $nc\text{-SiC}$.

На рис. 6 представлены спектры оптической плотности чистой сапфировой подложки (участка без $nc\text{-SiC}$ пленки) при различных флюенсах облучения и температурах отжига. Из полученных зависимостей было установлено, что изме-

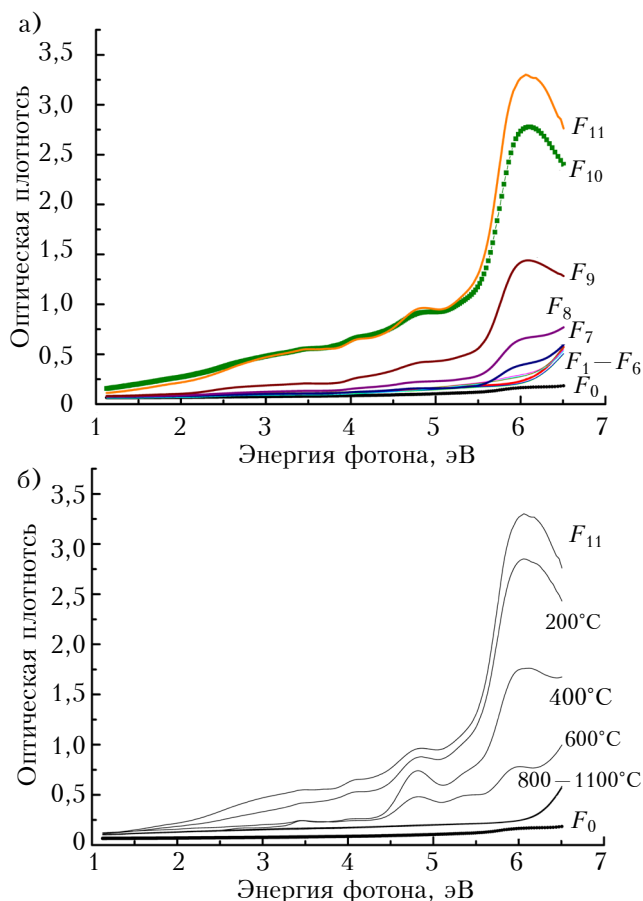


Рис. 6. Спектры ОП чистой сапфировой подложки (без пленки) при различных флюенсах облучения (а) и температурах отжига, проведенного после облучения флюенсом F_{11} (б)

нение оптических свойств подложки из Al_2O_3 начинает проявляться уже при первом электронном флюенсе (рис. 6, а). Пропускание уменьшается на 6,2% (на длине волны 327 нм) для флюенса F_1 и на 8,4% для флюенса F_6 . С флюенса F_7 ($5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$) начинают формироваться полосы поглощения возникших дефектов. Наибольший пик поглощения приходится на энергию фотона 6 эВ. Меньшие по интенсивности пики поглощения находятся на 4,06 и 4,85 эВ. Поглощение Al_2O_3 при 6 эВ (205 нм) и связанная с ним люминесценция при 3 эВ (415 нм) обусловлены переходами в энергетической структуре F -центра между p -подобным возбужденным состоянием, лежащим вблизи дна зоны проводимости, и s -подобным основным состоянием.

Характерные полосы поглощения при 4,8 эВ (260 нм) и 5,4 эВ (230 нм) связаны с F^+ -центром [28]. Для восстановления свойств монокристаллической подложки был проведен ряд отжигов в вакууме образца Al_2O_3 после облучения флюенсом F_{11} . Результаты показали, что при температурах отжига 800°C и выше сапфир практически восстанавливает свои оптические характери-

ки, как это видно из рис. 6, б. При этом, однако, оптические свойства у отожженных подложек близки к свойствам подложек, облученных флюенсами F_1 и F_2 , поскольку их пропускание на 6–7% меньше, чем для исходного образца.

Исследование оптической плотности системы «пленка — подложка»

На рис. 7 приведены спектры оптической плотности после флюенса F_9 системы «пленка nc -SiC — подложка Al_2O_3 » и ее составляющих. Начиная примерно с флюенса 10^{18} см $^{-2}$, оптическая плотность системы «пленка — подложка» существенно увеличивается за счет того, что растет оптическое поглощение радиационных дефектов в подложке Al_2O_3 .

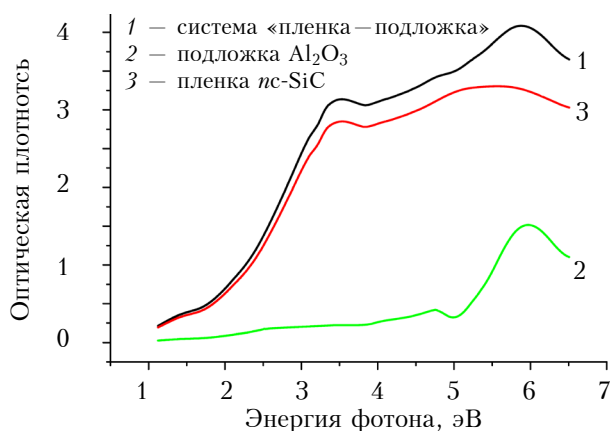


Рис. 7. Спектры ОП системы «пленка nc -SiC — подложка Al_2O_3 » и ее составляющих

Из приведенных зависимостей видно, что поглощение в сапфире в результате облучения усиливается в области фундаментального поглощения SiC (>2 эВ). Особенно значительный вклад поглощение в сапфире вносит в общее поглощение системы «пленка nc -SiC — подложка Al_2O_3 » в области 6–30%, что следует учитывать при разработке приборов на основе такой системы для эксплуатации в жестких радиационных условиях.

Выводы

Проведенные исследования влияния облучения системы, состоящей из пленки nc -SiC произвольного ромбоэдрического политаипа и подложки Al_2O_3 , высокоэнергетическими (10 МэВ) электронами на оптические свойства в широком диапазоне флюенсов (от $5 \cdot 10^{14}$ до $9 \cdot 10^{19}$ см $^{-2}$) показали, что радиационные изменения, в первую очередь, проявляются в УФ-области спектра, связанной с межзонными переходами, а затем в области спектра, обусловленной поглощением собственными дефектами и неупорядоченными областями. Вслед за некоторой начальной разупорядоченностью структуры пленок nc -SiC

при флюенсах $5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ происходит ее упорядочение при флюенсах $(1 - 5) \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$. Начало отжига дефектов в облученных пленках наблюдается уже при 200°C , что свидетельствует о большой концентрации углеродных вакансий, имеющих наименьшие энергии активации диффузии. Поскольку существенные изменения оптических свойств в сапфире начинаются при флюенсе $5 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$, это следует учитывать при использовании системы «пленка nc -SiC — подложка Al_2O_3 » для оптоэлектронных приборов и сенсоров, работающих в условиях интенсивных радиационных воздействий.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ackland G. Controlling radiation damage // Science. — 2010. — Vol. 327, iss. 5973. — P. 1587–1588. — <http://dx.doi.org/10.1126/science.1188088>
2. Misra A., Demkowicz M., Zhang X., Hoagland R. The radiation damage tolerance of ultra-high strength nanolayered composites // JOM. — 2007. — Vol. 59, iss. 9. — P. 62–65. — <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-007-0120-6>
3. Samaras M., Hoffelner, W., Victoria M. Irradiation of pre-existing voids in nanocrystalline iron // J. Nucl. Mater. — 2006. — Vol. 352, iss. 1–3. — P. 50–56. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.02.041>
4. Shen T.D., Feng Sh., Tang M., Valdez J.A., Wang Y., Sickafus K.E. Enhanced radiation tolerance in nanocrystalline $MgGa_2O_4$ // Appl. Phys. Lett. — 2007. — Vol. 90, iss. 24. — P. 263115–263120. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.3155855>
5. Hochbauer T., Misra A., Hattar K., Hoagland R. G. Influence of interfaces on the storage of ion-implanted He in multilayered metallic composites // J. Appl. Phys. — 2005. — Vol. 98, iss. 12. — P. 123516–123524. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.2149168>
6. Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, SiC, SiGe // Ed. by M.E. Levinstein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur. — USA, N.Y., John Wiley & Sons, 2001. — 216 p.
7. Barry A.L., Lehman B., Fritsch D., Brauning D. Mechanisms of unexpected reduction in hole concentration in Al-doped 4H-SiC by 200 keV electron irradiation // IEEE Trans. Nucl. Sci. — 1991. — Vol. 38. — P. 1111–1119. — <https://doi.org/10.1109/IETNAE>
8. Kalinina E.V. The effect of irradiation on the properties of SiC and devices based on this compound // Semiconductors. — 2007. — Vol. 41, iss. 7. — P. 745–783. — <https://doi.org/10.1134/S1063782607070019>
9. Lebedev A.A., Ivanov A.M., Stokan N.B. Radiation hardness of SiC and hard radiation detectors based on the SiC films // Semiconductors. — 2004. — Vol. 38, iss. 12. — P. 125–131.
10. Semenov A.V., Puzikov V.M., Dobrotvorskaya M.V., Fedorov A.G., Lopin A.V. Nanocrystalline SiC films prepared by direct deposition of carbon and silicon ions // Thin Solid Films. — 2008. — Vol. 516, iss. 10. — P. 2899–2905. — <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.059>
11. Brodyn M.S., Volkov V.I., Lyakhovetskii V.R., Rudenko V.I., Puzikov V.M., Semenov A.V., Nonlinear refraction in nanocrystalline silicon carbide films // JETP Letters. — 2008. — Vol. 88, iss. 6. — P. 442–444. — <https://doi.org/10.1134/S0021364008180094>
12. Borshch A.A., Brodyn M.S., Starkov V.N., Rudenko V.N., Volkov V.I., Boyarchuk A.Yu., Semenov A.V. Broadband optical limiting in thin nanostructured silicon carbide films and its nature // Optics Communication. — 2016. — Vol. 364. — P. 88–92. — DOI: 10.1016/j.optcom.2015.11.040
13. Semenov A.V., Pashchenko V.O., Khirnyi V.F., Kozlovskiy A.A., Mateichenko P.V. Magnetism in nanocrystalline SiC films // Physica E, Low-dimensional Systems and Nanostructures. — 2015. — Vol. 74. — P. 220–225. — <https://doi.org/10.1016/j.physe.2015.07.006>
14. Kozlovskiy A., Semenov A., Scoryk S. Electron transport in nanocrystalline SiC films obtained by direct ion deposition // Superlattices and Microstructures. — 2016. — Vol. 216. — P. 596–604. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.spmi.2016.10.013>

15. Semenov A. V., Lopin A. V., Puzikov V. M., Boriskin V. N. Effect of irradiation on the properties of nanocrystalline silicon carbide films // Semiconductors. — 2009. — Vol. 43, iss. 10. — P. 1322–1327. — <https://doi.org/10.1134/S106378260910011X>
16. Semenov A. V., Puzikov V. M., Golubova E. P. et al. Low-temperature production of silicon carbide films of different polytypes // Semiconductors. — 2009. — Vol. 43, iss. 5. — P. 685–689. — <https://doi.org/10.1134/S1063782609050273>
17. Ayzatsky M. I., Akchurin Yu. I., Beloglasov V. I. et al. Electron linacs in NSC KIPT: R&D and application. // Proc. of the 14th Conf. on Charged Particle Accelerators. — Russia, Protvino. — 1994. — Vol. 4. — P. 259–267.
18. Lopin, A. V., Semenov A. V., Puzikov V. M. Optical properties of Silicon Carbide obtained by direct ion deposition // Functional materials. — 2006. — Vol. 15, iss. 4. — P. 631–636.
19. Chakrabarti S., Ganduli D., Chaudhuri S. Optical properties of γ -Fe₂O₃ nanoparticles dispersed on sol-gel silica spheres // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. — 2004. — Vol. 24, iss. 3-4. — P. 333–342. — <https://doi.org/10.1016/j.physe.2004.06.036>.
20. Choyke W. J. Optical and electronic properties of SiC // The Physics and Chemistry of Carbides, Nitrides and Borides, NATO ASI Series. — 1990. — Vol. 185. — P. 563–587.
21. Srikant V., Clarke D. R. On the optical band gap of zinc oxide // J. Appl. Phys. — 1997. — Vol. 81, iss. 10. — P. 6357–6364. — <http://dx.doi.org/10.1063/1.367375>.
22. Gorbatenko L. S., Novodvorsky O. A., Panchenko V. Ya. et al. Characterization of ZnO:Ga and ZnO:N films prepared by PLD // Laser Physics. — 2009. — Vol. 19,

iss. 5. — P. 1152–1157. — <https://doi.org/10.1134/S1054660X11080019>

23. Mott N.F., Davis E.A. Electronic processes in non-crystalline materials. — Oxford: Seiten, 1971. — 437 p.

24. Семенов А.В., Лопин А.В., Пузиков В.М. Низкотемпературное получение и оптические свойства пленок карбида кремния // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2004. — вып. 9. — С. 99–106.

25. Лопин А.В., Семенов А.В., Пузиков В.М. Оптический датчик температуры на основе нанокристаллической пленки SiC // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — Вып. 4. — P. 22.

26. Bockstedte M., Mattausch A., Pankratov O. Ab initio study of the annealing of vacancies and interstitials in cubic SiC: Vacancy interstitial recombination and aggregation of carbon interstitials // Phys. Rev. B. — 2004. — Vol. 69. — P. 235202–235212. — <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.483-485.523>.

27. Evans B. D., Pogatschnik G. J., Chen Y. Optical properties of lattice defects in α -Al₂O₃ // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. — 1994. — Vol. 91. — P. 258–262. — [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(94\)96227-8](https://doi.org/10.1016/0168-583X(94)96227-8).

28. Evans B. D., Stapelbroek M. Optical properties of the F⁺-center in crystalline Al₂O₃ // Phys. Rev. B. — 1978. — Vol. 18, iss. 12. — P. 7089–7098. — <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.18.7089>.

Дата поступления рукописи
в редакцию 01.12.2016 г.

О. В. СЕМЕНОВ^{1,2}, О. В. ЛОПИН¹, В. Н. БОРИСКИН³

Україна, м. Харків, ¹Інститут монокристалів НАНУ,
²НТУ «Харківський політехнічний інститут»,
³ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАНУ
E-mail: savladi@ukr.net

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК НАНОКРИСТАЛІЧНОГО SiC НА ПІДКЛАДКАХ З МОНОКРИСТАЛА Al₂O₃

Досліджено стійкість до радіації плівок нанокристалічного карбиду кремнію на підкладці з монокристала сапфіра в умовах опромінення високоенергетичними (10 MeV) електронами в діапазоні $5 \cdot 10^{14}$ – $2 \cdot 10^{20}$ см⁻². Встановлено, що радіаційні зміни в плівках nc-SiC в першу чергу проявляються в УФ-області спектра поглинання, яка пов'язана з міжзонними переходами. Показано, що слідом за початковою розупорядкованістю плівок nc-SiC при флюенсі $5 \cdot 10^{14}$ – $1 \cdot 10^{16}$ см⁻² відбувається впорядкування структури при дозах опромінення $(1-5) \cdot 10^{17}$ см⁻². Встановлено, що початок відпалу дефектів в опромінених плівках спостерігається вже за температури 200°C. Істотні зміни оптичних властивостей в сапфірі починаються при флюенсі $5 \cdot 10^{17}$ см⁻², що слід враховувати при використанні цих матеріалів для оптико-електронних приладів і сенсорів в умовах інтенсивного радіаційного впливу.

Ключові слова: нанокристалічні плівки SiC, монокристали Al₂O₃, спектри поглинання, опромінення електронами, радіаційні дефекти, радіаційне упорядкування, відпал дефектів.

DOI: 10.15222/TKEA2017.3.40
UDC 539.216.281,261

A. V. SEMENOV^{1,2}, A. V. LOPIN¹, V. N. BORISKIN³

Ukraine, Kharkiv, ¹Institute for Single Crystals of NASU,
²NTU «Kharkiv Polytechnic Institute»,
³National Scientific Center «Kharkov Institute of Physics & Technology» of NASU
E-mail: savladi@ukr.net

EFFECT OF ELECTRON IRRADIATION ON THE OPTICAL PROPERTIES OF NANOCRYSTALLINE SiC FILMS ON SINGLE CRYSTAL Al₂O₃ SUBSTRATES

It was studied the effect of irradiation with high-energy (10 MeV) electrons on the optical properties of nanocrystalline carbide film system silicon / sapphire substrates in a wide range of fluences of $5 \cdot 10^{14}$ to $9 \cdot 10^{19}$ cm⁻² and subsequent annealing in vacuum in the range of 200–1200°C. It was found that radiation-induced changes in the optical properties of nc-SiC films is primarily manifested in the UV region of the spectrum associated with interband transitions, as well as in the region of the spectrum due to the absorption of intrinsic

defects and disordered regions. It was established in the beginning of the annealing of defects in irradiated films has been observed at 200°C, which indicates the high concentration of carbon vacancies with the lowest activation energy. Significant changes in the optical properties of sapphire begin at fluence $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, which should be considered when using these materials under conditions of intense radiation impact.

Keywords: nanocrystalline SiC films, Al_2O_3 single crystals, absorption spectra, electron irradiation, radiation defects, radiation ordering, annealing of defects.

REFERENCES

- Ackland G. Controlling radiation damage. *Science*. 2010, vol. 327, iss. 5973, pp. 1587-1588. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1188088>
- Misra A., Demkowicz M., Zhang X., Hoagland R. The radiation damage tolerance of ultra-high strength nanolayered composites. *JOM*, 2007, vol. 59, iss. 9, pp. 62-65. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-007-0120-6>
- Samaras M., Höffelner, W., Victoria M. Irradiation of pre-existing voids in nanocrystalline iron. *J. Nucl. Mater.*, 2006, vol. 352, iss. 1-3, pp. 50-56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.02.041>
- Shen T.D., Feng Sh., Tang M., Valdez J.A., Wang Y., Sickafus K.E. Enhanced radiation tolerance in nanocrystalline MgGa_2O_4 . *Appl. Phys. Lett.*, 2007, vol. 90, iss. 24, pp. 263115-263120. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3155855>
- Hochbauer T., Misra A., Hattar K., Hoagland R. G. Influence of interfaces on the storage of ion-implanted He in multilayered metallic composites. *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 98, iss. 12, pp. 123516-123524. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2149168>
- Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, SiC, SiGe. Ed. by M.E. Levinshstein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur. USA, N.Y., John Wiley & Sons, 2001, 216 p.
- Barry A.L., Lehman B., Fritsch D., Brauning D. Mechanisms of unexpected reduction in hole concentration in Al-doped 4H-SiC 4H-SiC by 200 keV electron irradiation. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1991, vol. 38, pp. 1111-1119, <https://doi.org/10.1109/IETNAE>
- Kalinina E.V. The effect of irradiation on the properties of SiC and devices based on this compound. *Semiconductors*. 2007, vol. 41, iss. 7, pp. 745-783. <https://doi.org/10.1134/S1063782607070019>
- Lebedev A. A., Ivanov A. M., Stokan N. B. Radiation hardness of SiC and hard radiation detectors based on the SiC films. *Semiconductors*, 2004, vol. 38, iss. 12, pp. 125-131.
- Semenov A.V., Puzikov V.M., Dobrotvorskaya M.V., Fedorov A.G., Lopin A.V. Nanocrystalline SiC films prepared by direct deposition of carbon and silicon ions. *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, iss. 10, pp. 2899-2905. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.05.059>
- Brodyn M.S., Volkov V.I., Lyakhovetskii V.R., Rudenko V.I., Puzikov V.M., Semenov A.V. Nonlinear refraction in nanocrystalline silicon carbide films. *JETP Letters*, 2008, vol. 88, iss. 6, p. 442-444. <https://doi.org/10.1134/S0021364008180094>
- Borshch A.A., Brodyn M.S., Starkov V.N., Rudenko V.N., Volkov V.I., Boyarchuk A.Yu., Semenov A.V. Broadband optical limiting in thin nanostructured silicon carbide films and its nature. *Optics Communication*, 2016, vol. 364, pp. 88-92. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.11.040>
- Semenov A.V., Pashchenko V.O., Khirnyi V.F., Kozlovskiy A.A., Mateichenko P.V. Magnetism in nanocrystalline SiC films. *Physica E, Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2015, vol. 74, pp. 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2015.07.006>
- Kozlovskiy A., Semenov A., Scoryk S. Electron transport in nanocrystalline SiC films obtained by direct ion deposition. *Superlattices and Microstructures*, 2016, vol. 216, pp. 596-604. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spmi.2016.10.013>
- Semenov A. V., Lopin A. V., Puzikov V. M., Boriskin V. N. Effect of irradiation on the properties of nanocrystalline silicon carbide films. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, iss. 10, pp. 1322-1327. <https://doi.org/10.1134/S106378260910011X>
- Semenov A.V., Puzikov V.M., Golubova E.P., Baumer V.N., Dobrotvorskaya M.V. Low-temperature production of silicon carbide films of different polytypes. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, iss. 5, pp. 685-689. <https://doi.org/10.1134/S1063782609050273>
- Ayzatsky M.I., Akchurin Yu.I., Beloglaso V.I., Biller E.Z., Boriskin V.N., Gurin V.A., Demidov N.V., Dovbnya A.N., Krivchikov B.P., Myfel V.B., Popenko V.A., Kushnir V.A., Levandovsky S.P., Mitrochenko V.V., Stepin D.L., Shendrik V.A., Savchenko A.N., Tolsto L.E., Terehov, B.A., Tur Yu.D., Vishnyakov V.A., Uvarov V.L., Zavada A.V. Electron linacs in NSC KIPT: R&D and application. *Proc. 14th Conf. on Charged Particle Accelerators*. Russia, Protvino, 1994, vol. 4, pp. 259-267.
- Lopin, A. V., Semenov A.V., Puzikov V. M. Optical properties of Silicon Carbide obtained by direct ion deposition. *Functional materials*, 2006, vol. 15, iss. 4, pp. 631-636.
- Chakrabarti S., Ganduli D., Chaudhuri S. Optical properties of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles dispersed on sol-gel silica spheres. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2004, vol. 24, iss. 3-4, pp. 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2004.06.036>
- Choyke W.J. Optical and electronic properties of SiC. *The Physics and Chemistry of Carbides, Nitrides and Borides*, NATO ASI Series, 1990, vol. 185, pp. 563-587.
- Srikant V., Clarke D. R. On the optical band gap of zinc oxide. *J. Appl. Phys.*, 1997, vol. 81, iss. 10, pp. 6357-6364. <http://dx.doi.org/10.1063/1.367375>
- Gorbatenko L. S., Novodvorsky O. A., Panchenko V. Ya., Khramova O. D., Cherebilo Ye. A., Lotin A. A., Wenzel C., Trumpaická N., Bartha J. W. Characterization of ZnO:Ga and ZnO:N films prepared by PLD. *Laser Physics*, 2009, vol. 19, iss. 5, pp. 1152-1157. <http://dx.doi.org/10.1134/S1054660X11080019>
- Mott N. F., Davis E. A. *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*. Oxford. Seiten, 1971, 437 p.
- Semenov A.V., Lopin A.V., Puzikov V.M. [Low-temperature production and optical properties of silicon carbide films]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*, 2004, iss. 9, pp. 99-106.
- Lopin A.V., Semenov A.V., Puzikov V.M. [Optical temperature sensor based on a nanocrystalline SiC film]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2007, iss. 4, pp. 22.
- Bockstedte M., Mattausch A., Pankratov O. Ab initio study of the annealing of vacancies and interstitials in cubic SiC: Vacancy interstitial recombination and aggregation of carbon interstitials. *Phys. Rev. B*, 2004, vol. 69, pp. 235202-235212. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.483-485.523>
- Evans B. D., Pogatshnik G. J., Chen Y. Optical properties of lattice defects in $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 1994, vol. 91, pp. 258-262. — [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(94\)96227-8](https://doi.org/10.1016/0168-583X(94)96227-8)
- Evans B. D., Stapelbroek M. Optical properties of the F⁺-center in crystalline Al_2O_3 . *Phys. Rev. B*, 1978, vol. 18, iss. 12, pp. 7089-7098. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.18.7089>

К. т. н. А. Н. ТЫНЫНКА

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: nikal1091@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИЙНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЧИСЛА ИНТЕРВАЛОВ ПРИ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ОЦЕНКАХ

Показано, что в качестве критерия выбора числа интервалов группирования опытных данных при интервальных оценках может использоваться энтропийный коэффициент. В соответствии с описанной процедурой быстрого определения числа интервалов на массиве данных исследована точность имеющихся в литературе и предложенных новых формул. Проведен анализ в сравнении с ранее опубликованными результатами применения для этих целей критерия согласия Пирсона. Сделаны расчеты с целью сравнения эффективности применения одних и тех же формул при распределении выборочных данных по нормальному закону и по закону Рэлея.

Ключевые слова: энтропийный коэффициент, число интервалов группирования, интервальные оценки, распределение Рэлея, нормальное распределение.

В процесс управления качеством продукции промышленного предприятия входит сбор экспериментальных данных с последующей их обработкой. В процедуру первичной обработки результатов эксперимента чаще всего включают сопоставление гипотез о законе распределения данных, описывающем с наименьшей погрешностью случайную величину по наблюдаемой выборке. В этом случае выборка представляется в виде гистограммы, состоящей из k столбцов, построенных на интервалах протяженностью d . Идентификации формы распределения результатов (или погрешностей) измерений требует также ряд задач, эффективность решения которых различна для различных распределений (например, использование метода наименьших квадратов или вычисление оценок энтропии). Идентификация распределений нужна еще и потому, что рассеяние всех оценок (среднего квадратического отклонения, эксцесса, контрэксцесса и др.) опять-таки зависит от формы закона распределения, как показано в исследованиях, на которые принято ссылаться как на классические [1–4].

От объема выборки зависит успешность идентификации формы распределения экспериментальных данных, и если он мал, особенности распределения оказываются замаскированными случайностью самой выборки. В такой ситуации важно наилучшим образом распределить выборочные данные по интервалам, когда для дальнейшего анализа и расчетов интервальный

ряд необходим. И тут сразу же возникает вопрос о назначении числа интервалов k , потому что от этого зависит успешность идентификации. А. Хальд в книге [1] пространно убеждает, что существует оптимальное число интервалов группирования, когда ступенчатая огибающая гистограммы, построенной на этих интервалах, наиболее близка к плавной кривой распределения генеральной совокупности. Одним из практических признаков приближения к оптимуму может служить исчезновение в гистограмме провалов, и тогда близким к оптимуму считается наибольшее k , при котором гистограмма еще сохраняет плавный характер.

Очевидно, что вид гистограммы зависит от построения интервалов принадлежности случайной величины. Однако даже в случае равномерного разбиения до сих пор нет удовлетворительного способа такого построения. Разбиение, которое можно было бы считать правильным, приводит к тому, что ошибка аппроксимации кусочно-постоянной функцией предположительно непрерывной плотности распределения (гистограммой) будет минимальной. Затруднения тут вызваны тем, что оцениваемая плотность неизвестна, поэтому число интервалов сильно скачивается на виде распределения частот конечной выборки. При фиксированной ее длине укрупнение интервалов разбиения ведет не только к уточнению эмпирической вероятности попадания в них, но и к неизбежной потере информации (как в общем широком смысле, так и в смыс-

ле кривой распределения плотности вероятности), поэтому при дальнейшем необоснованном укрупнении слишком сильно сглаживается изучаемое распределение.

Однажды возникнув, задача оптимального разбиения размаха под гистограмму не исчезает из поля зрения специалистов, и пока не появится единственное устоявшееся мнение относительно ее решения, задача будет оставаться актуальной. Решения время от времени предлагаются — либо эмпирические (откровенно или завуалированно), либо авторы сильно упрощают задачу, считая априори известным закон распределения вероятностей. Иногда рекомендации имеют произвольно-директивный характер типа «число интервалов не должно выходить за пределы 6...20», при этом игнорируется даже то очевидное обстоятельство, что названный диапазон слишком широк и делать выбор нужно в нем.

Первым, вероятно, был Старджес, который еще в 1926 году в [2] рассмотрел идеализированную гистограмму из k интервалов, где i -е значение было равно биномиальному коэффициенту:

$k_i = C_{k-1}^{i-1}$. Если считать это правомерным, то дальше на основании формальных преобразований можно записать для суммы коэффициентов (групповых частот) следующее:

$$\sum_{i=1}^k C_{k-1}^{i-1} = \sum_{i=1}^k k_i = 2^{k-1} = n,$$

откуда

$$k = 1 + 3,3 \lg n, \quad (1)$$

где n — объем выборки.

В таком виде формула попала практически во все учебники по статистике. При этом она статистически не обоснована, но ее, пожалуй, все же можно считать полуэмпирической, а не полностью подобранной.

В 1942 г. Манн и Вальд ушли от логарифмической зависимости и дали оценку оптимального числа интервалов в виде степенной функции [3] $k = 4 \cdot [0,75(n-1)^2]^{1/5}$. (2)

В 1950 г. Н. В. Смирнов показал, что отклонение гистограммы от неизвестного графика плотности убывает с увеличением выборки по закону $1/n^{1/3}$ [4].

В [5] Д. Скотт для оценки длины интервала гистограммы минимизировал среднеквадратическую ошибку и получил для случая дифференцируемой плотности асимптотическую оценку оптимальной длины интервала

$$d = \sqrt[3]{\frac{6}{n \int_{-\infty}^{+\infty} [f'(x)]^2 dx}},$$

т. е. здесь число интервалов пропорционально $n^{1/3}$.

Для нормального распределения

$$d \approx \frac{3,5\sigma}{\sqrt[3]{n}},$$

где σ — среднеквадратическое отклонение.

Следует отметить, что часто эту формулу применяют для первоначальной оценки длины интервалов при неизвестном законе распределения.

В случае простого линейного распределения $f(x) = 2x$ оптимальная длина интервала

$$d = \sqrt[3]{\frac{3}{2n}},$$

и если функция $f(x)$ задана на отрезке $[0; 1]$, получим

$$k = \sqrt[3]{\frac{2n}{3}}. \quad (3)$$

В [6, с. 51] была приведена оценка числа интервалов оптимального разбиения для аппроксимации дважды дифференцируемой плотности $f(x)$:

$$k = \sqrt[5]{\frac{n |f'''(x)|_{\max}}{4 |f(x)|_{\max}}}. \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) нельзя применять к равномерному распределению и к плоским трапециевидным распределениям.

Еще одна формула без каких-либо пояснений и доказательств приводится в [7, с. 178; 8, с. 81] (в [7] — со ссылкой на автореферат кандидатской диссертации И. У. Алексеевой, 1975 г.):

$$k = \frac{1}{6} (1 + \chi) \sqrt[5]{n^2}, \quad (5)$$

где χ — эксцесс распределения.

В [7] собрано несколько эвристических формул нахождения числа интервалов в зависимости от выборки, предложенных разными авторами. Но поскольку при значительных объемах выборок разброс значений интервалов, задаваемых различными формулами, довольно велик, в [9] была поставлена задача выяснить, какая из имеющихся формул наилучшая. Предполагалось, что генеральная совокупность экспериментальных данных, из которой взята исследуемая выборка, имеет гладкую кривую распределения, чтобы можно было считать, что появляющиеся при группировании провалы и всплески на отдельных интервалах порождаются случайностью попадания измеренных значений в малую

выборку. На заводе из 500 заготовок, к которым при изготовлении предъявлялось требование по массе $m = 17_{-04}^{06}$ кг, было отобрано 80 и измерена их масса. Число интервалов определялось по шести формулам, строились равноинтервальные ряды, на их основе — гистограммы и делалось заключение о наиболее точной формуле. В качестве критерия использовался критерий согласия Пирсона.

Критерий Пирсона, как известно, требует разбиения выборки на интервалы — именно в них производится оценка отличия между принятой моделью и сравниваемой выборкой. Однако применение этого критерия в случае интервалов постоянной длины, используемых обычно для построения гистограмм, неэффективно. Поэтому в работах по эффективности критерия Пирсона рассматриваются интервалы не с равной длиной, а с равной вероятностью в соответствии с принимаемой моделью. При этом, однако, число интервалов равной длины и число интервалов равной вероятности различаются в разы (за исключением равновероятного распределения), что позволяет сомневаться в достоверности полученных в [9] результатов.

В настоящей работе с использованием энтропийного коэффициента в качестве критерия близости исследована правомочность применения имеющихся в литературе и предложенных автором формул, предназначенных для определения оптимального числа интервалов группирования экспериментальных данных, а также их эффективность при распределении плотности вероятности, отличным от нормального.

Исследуемые формулы и методика проведения их оценки

Оценим одиннадцать выражений — шесть, которые были рассмотрены в [9], и пять, предложенных в настоящей работе. Кроме приведенной выше формулы Старджеса (1), это следующие:

— Брукса и Каррузера

$$k = 5 \lg n; \quad (6)$$

— И. Хайнхольда и К. Гаеде

$$k = n^{1/2}; \quad (7)$$

— З. Таушанова

$$k = 4 \lg n; \quad (8)$$

— Е. Тоневой

$$k = 5 \lg(0,1n); \quad (9)$$

— К. Уильямса

$$k = 2[0,85(n-1)]^{0,4} - 1; \quad (10)$$

$$k = 5 \lg n - 1; \quad (11)$$

$$k = 10(\lg n - 1) \quad (12)$$

$$k = 2n^{1/3}; \quad (13)$$

$$k = 6 \lg(0,1n) + 6; \quad (14)$$

$$k = 2(2n)^{1/3}. \quad (15)$$

Для выбора наиболее точной формулы воспользуемся энтропийным коэффициентом $k_{\text{э}}$, предложенным в качестве числовой характеристики формы распределения в [10]. По гистограмме он вычисляется как

$$k_{\text{э}} = \frac{dn}{2\sigma} 10^{\beta}, \quad (16)$$

$$\beta = -\frac{1}{n} \sum_{j=1}^k (n_j \lg n_j),$$

где n_j — число наблюдений в j -м интервале, $j = 0, \dots, k$.

Процедура, по которой будем проводить оценку точности формул, следующая.

1) Из исходной, большой, выборки путем удаления всех нечетных членов сформируем меньшую выборку.

2) Найдем значения числа интервалов по меньшей выборке в соответствии с приведенными формулами для расчета k .

3) Определим диапазон значений k , в котором будут проводиться расчеты энтропийного коэффициента $k_{\text{э}}$.

4) Вычислим энтропийный коэффициент по большой выборке для максимального значения k и примем его за эталонный ($k_{\text{ээ}}$).

5) Вычислим энтропийный коэффициент по меньшей выборке для всех, кроме максимального, значений k ($k_{\text{эк}}$).

6) Путем сравнения полученных данных установим, при каком числе интервалов значение $k_{\text{эк}}$ будет наиболее близким к эталонному, а затем, какие формулы дали такое же число интервалов — именно они будут считаться самыми точными.

Проверка формул на массиве данных, распределенных по закону Гаусса

Для корректного сравнения результатов наших исследований с полученными в [9] будем рассматривать экспериментальную выборку с такими же, как и в [9], параметрами — объем $n = 80$, размах $R = 0,98$ кг, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,238$ кг. Тогда, в соответствии с описанной выше процедурой, сформируем меньшую выборку объемом 40 и рассчитаем по исследуемым формулам значения числа интервалов k .

Как видно из табл. 1, значения k лежат в диапазоне 3—10. Поскольку задавать $k = 3$ не рационально, для дальнейших расчетов будем рассматривать значения k в диапазоне от 4 до 12.

При разбиении исходной выборки на 12 равных частей ($k = 12$) получаем по формуле (16) эталонный энтропийный коэффициент $k_{\text{ээ}} = 1,89$.

Таблица 1
Результаты расчета k по малой выборке для
двух видов распределения

Номер формулы	Число интервалов k при распределении	
	Гаусса	Рэля
(1)	6	7
(6)	8	8
(7)	6	7
(8)	6	7
(9)	3	4
(10)	7	8
(11)	7	8
(12)	6	7
(13)	7	7
(14)	10	10
(15)	9	9

Результаты расчета $k_{\text{эк}}$ при числе интервалов от 4 до 11 приведены в табл. 2. Сравнение этих значений с эталонным показывает, что наилучшая гистограмма будет построена на семи интервалах. При этом, как видно из табл. 1, значение $k = 7$ дают формула Уильямса (10) и предложенные в данной работе формулы (11) и (13). Одинаково ухудшается результат при разбиении на 6 и 8 интервалов, при этом $k = 6$ получается по формулам (1), (7), (8), (12), а $k = 8$ — по формуле (6). Еще хуже будет гистограмма на 10 интервалах (формула (14)) и на 9 (формула (15)).

Таким образом, при использовании энтропийного коэффициента формулы, рассмотрен-

ные в [9], по убыванию точности располагаются следующим образом: (10), (1), (6), (7), (8), (9). Последовательность же, полученная в [9], другая, а именно: (7), (1), (10), (8), (6), (9).

Проверка формул на массиве данных, распределенных по закону Рэля

Проверим, изменится ли полученный рейтинг формул для распределения, отличного от нормального. Для оценки выберем закон Рэля $f(x) = x \cdot \exp(-x^2/(2\sigma^2))/\sigma^2$.

Чтобы получить исследуемую выборку объемом 100, с помощью программы Mathworks Matlab были сгенерированы 100 чисел, распределенных по этому закону в диапазоне от 0 до 100 (с точностью пяти знаков после запятой), и округлены до целых для внесения помехи. Размах полученного вариационного ряда составил 98. Соответственно, объем меньшей выборки составляет 50. Рассчитанные при $n = 50$ значения числа интервалов k также приведены в табл. 1.

В данном случае разобьем большую выборку на 14 равных интервалов и получим $k_{\text{эз}} = 2,23$.

Определим значения $k_{\text{э}}$ по малой выборке для числа интервалов 4–10. Из результатов, представленных в табл. 2, видно, что самый близкий к $k_{\text{эз}}$ энтропийный коэффициент — $k_{\text{э7}}$, а не $k_{\text{э6}}$, как в предыдущем случае. Причиной сдвига оптимального числа интервалов в большую сторону, очевидно, является увеличение на 25% объема выборки, а также изменение закона распределения выборочных данных.

Как можно видеть из табл. 2, по убыванию точности формулы теперь расположились в такой последовательности: (15), (6), (10), (11), (1), (7), (8), (12), (13), (14), (9).

Таким образом, формулы, которые были лучшими при исследовании нормальной выборки, в

Таблица 2
Результаты расчета по малой выборке для двух видов распределения при различных заданных значениях k

k	Распределение Гаусса		Распределение Рэля	
	$k_{\text{эк}}$	Формула*	$k_{\text{эк}}$	Формула*
4	$k_{\text{э4}} = 1,51$		$k_{\text{э4}} = 1,66$	(9)
5	$k_{\text{э5}} = 1,81$		$k_{\text{э5}} = 1,72$	
6	$k_{\text{э6}} = 1,82$	(1); (7); (8); (12)	$k_{\text{э6}} = 1,73$	
7	$k_{\text{э7}} = 1,85$	(10); (11); (13)	$k_{\text{э7}} = 1,74$	(1); (7); (8); (12); (13)
8	$k_{\text{э8}} = 1,82$	(6)	$k_{\text{э8}} = 1,75$	(6); (10); (11)
9	$k_{\text{э9}} = 1,77$	(15)	$k_{\text{э9}} = 1,95$	(15)
10	$k_{\text{э10}} = 1,8$	(14)	$k_{\text{э10}} = 1,71$	(14)
11	$k_{\text{э11}} = 1,78$			

*Номера формул, при расчете по которым по меньшей выборке получается число интервалов, указанное в графе « k »

случае распределения выборочных данных по закону Рэлея показали хорошие, но все же не лучшие результаты, что подтверждает зависимость оптимального числа интервалов от вида закона распределения экспериментальных данных.

Заключение

В результате проведенных расчетов были обнаружены различия в точности рассмотренных формул при определении числа интервалов для построения наилучшей гистограммы при интервальных оценках по критериям Пирсона и при использовании энтропийного коэффициента k_e . Во втором случае лучшей из шести исследованных в [9] была определена формула Брукса и Каррузера (6) — и для распределения Гаусса, и для распределения Рэлея, тогда как в [9] она была предпоследней в рейтинге.

Таким образом, вычисления, проведенные в диапазоне распространенных на производстве малых выборок, подтвердили эффективность использования энтропийного коэффициента вместо критерия Пирсона для выбора числа интервалов в случае построения равноинтервальной гистограммы по экспериментальным данным.

Далее интересным представляется проверить возможность использования других характеристик распределения случайных величин, например эксцесса и контрэксцесса, и сравнить точность и удобство расчетов с применением энтропийного коэффициента.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. — Москва: Изд-во иностр. лит., 1956.
2. Sturges H. A. The choice of a class interval // JASA. — 1926. — V. 21. — С. 65–66.
3. Mann H. B., Wald A. On the choice of the number of intervals in the application of the chi-square test // Ann. Math. Statist. — 1942. — Vol. 13. — С. 478–479.
4. Смирнов Н. В. О построении доверительной области для плотности распределения случайной величины // Доклады АН СССР. — 1950. — Т. 74, № 2. — С. 189–192.
5. Scott D. W. On optimal and data-based histograms // Biometrika. — 1979. — Vol. 66. — С. 605–610.
6. Лившиц М. Е., Иванов-Муромский К. А., Заславский С. Я. и др. Численные методы анализа случайных процессов. — Москва: Наука, 1976.
7. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. — Ленинград: Энергоатомиздат, 1991.
8. Булашев С. В. Статистика для трейдеров. — Москва: Компания Спутник+, 2003.
9. Калмыков В. В., Антонюк Ф. И., Зенкин Н. В. Определение оптимального количества классов группирования экспериментальных данных при интервальных оценках // Южносибирский научный вестник. — 2014. — №3. — С. 56–58.
10. Новицкий П. В. Понятие энтропийного значения погрешности // Измерительная техника. — 1966. — № 7. — С. 11–14.

Дата поступления рукописи
в редакцию 03.05 2017 г.

О. М. ТИНИНИКА

Україна, Одеський національний політехнічний університет
E-mail: nikal1091@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ ЕНТРОПІЙНОГО КОЕФІЦІЄНТА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЧИСЛА ІНТЕРВАЛІВ ПРИ ІНТЕРВАЛЬНИХ ОЦІНКАХ

Показано, що як критерій вибору числа інтервалів групування досліджених даних при інтервальних оцінках можна використовувати ентропійний коефіцієнт. Відповідно до описаної процедури швидкого визначення числа інтервалів на масиві даних досліджено точність наявних в літературі і запропонованих нових формул. Проведено аналіз в порівнянні з раніше опублікованими результатами застосування для цих цілей критерію згоди Пірсона. Зроблено розрахунки з метою порівняння ефективності застосування одних і тих самих формул при розподілі вибірових даних за нормальним законом і за законом Релея.

Ключові слова: ентропійний коефіцієнт, число інтервалів групування, інтервальні оцінки, розподіл Релея.

DOI: 10.15222/TKEA2017.3.49
UDC 621.9

A. N. TYNANYUKA

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
E-mail: nikal1091@gmail.com

APPLICATION OF THE ENTROPIC COEFFICIENT FOR INTERVAL NUMBER OPTIMIZATION DURING INTERVAL ASSESSMENT

In solving many statistical problems, the most precise choice of the distribution law of a random variable is required, the sample of which the authors observe. This choice requires the construction of an interval series.

Therefore, the problem arises of assigning an optimal number of intervals, and this study proposes a number of formulas for solving it. Which of these formulas solves the problem more accurately?

In [9], this question is investigated using the Pearson criterion. This article describes the procedure and on its basis gives formulas available in literature and proposed new formulas using the entropy coefficient. A comparison is made with the previously published results of applying Pearson's concord criterion for these purposes. Differences in the estimates of the accuracy of the formulas are found. The proposed new formulas for calculating the number of intervals showed the best results.

Calculations have been made to compare the work of the same formulas for the distribution of sample data according to the normal law and the Rayleigh law.

Keywords: entropy coefficient, grouping intervals number, interval estimates, Rayleigh distribution.

REFERENCES

1. Hald A. *Matematicheskaya statistika s tekhnicheskimi prilozheniyami* [Mathematical statistics with technical applications]. Moscow, Izd-vo inostr. lit, 1956.
2. Sturges H. A. The choice of a class interval. *JASA*, 1926, vol. 21, pp. 65-66.
3. Mann H. B., Wald A. On the choice of the number of intervals in the application of the chi-square test. *Ann. Math. Statist.*, 1942, vol. 13, pp. 478-479.
4. Smirnov N. V. [On the construction of a confidence domain for the distribution density of a random variable]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1950, vol. 74, no 2, pp. 189-192 (Rus)
5. Scott D. W. On optimal and data-based histograms. *Biometrika*, 1979, vol. 66, pp. 605-610.
6. Livshits M. E., Ivanov-Muromsky K. A., Zaslavsky S. Ya., Voitinsky E. Ya., Lerner V. F., Romm B. I. *Chislavye metody analiza sluchainykh protsessov* [Numerical methods of analysis of random processes]. Moscow, Nauka, 1976. (Rus)
7. Novitsky P. V., Zograf I. A. *Otценка pogreshnostei rezultatov ismerenii* [Estimation of errors in measurement results]. Leningrad, Energoatomizdat, 1991. (Rus)
8. Bulashev S. V. *Statistika dlya treiderov* [Statistics for traders]. Moscow, Sputnik company+, 2003. (Rus)
9. Kalmykov V. V., Antonyuk F. I., Zenkin N. V. [Determination of the optimal number of classes of grouping of experimental data for interval estimates]. *Yuzhnosibirskii nauchnyi vestnyk*, 2014, no 3, pp. 56-58. (Rus)
10. Novitsky, P. V. [The concept of the entropy value of error]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 1966, no 7, pp. 11-14. (Rus)

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

Большакова Инесса Антоновна, докт. техн. наук, профессор, Национальный университет «Львовская политехника»

Глушеченко Эдуард Николаевич, канд. техн. наук, начальник отдела, НПП «Сатурн», г. Киев

Долгов Юрий Александрович, докт. техн. наук, Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко, г. Тирасполь

Захарченко Александр Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

Карушкин Николай Федорович, канд. техн. наук, начальник отдела НИИ «Орион», г. Киев

Николаенко Юрий Егорович, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Рябуха Вячеслав Петрович, канд. техн. наук, заместитель начальника отделения, НИИ радиолокационных систем «Квант-Радиолокация», г. Киев

Сугак Дмитрий Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Национальный университет «Львовская политехника»

Трофимов Владимир Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет

Шинкаренко Владимир Викторович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

Шишкин Михаил Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

1. К рассмотрению принимаются статьи прикладной направленности на русском, украинском или английском языке, которые не были опубликованы ранее и не переданы для публикации в другие издания.

2. В журнале публикуются научно-практические и экспериментальные работы по следующим тематическим направлениям:

- Современные электронные технологии;
- Новые компоненты для электронной аппаратуры;
- Электронные средства: исследования, разработки;
- СВЧ-техника;
- Системы передачи и обработки сигналов;
- Микропроцессорные устройства и системы;
- Энергетическая электроника;
- Полупроводниковая светотехника;
- Биомедицинская электроника;
- Сенсоэлектроника;
- Функциональная микро- и наноэлектроника;
- Обеспечение тепловых режимов;
- Технологические процессы и оборудование;
- Материалы электроники;
- Метрология. Стандартизация.

3. Все поступающие к рассмотрению материалы проходят двухсторонне закрытое рецензирование.

4. При обнаружении плагиата или фальсификации результатов статья отклоняется.

5. Редакция не взимает плату за опубликование рукописи и не выплачивает авторский гонорар.

6. Обязательным условием для принятия статьи к печати является ее соответствие общепринятым нормам построения научной публикации, то есть наличие в ней:

- постановки проблемы в общем виде с указанием ее связи с важными научными или практическими задачами;
- анализа последних достижений и публикаций, в которых рассматривается описанная проблема, с выделением той ее части, решению которой посвящена данная статья;
- цели статьи (постановки задачи);
- основного материала с обсуждением и интерпретацией полученных результатов;
- выводов, а также указания на перспективы проведения исследований в данном направлении.

Кроме этого, при оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- возможность практического применения;
- целесообразность таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;
- строгость терминологии;
- композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

7. Статья должна быть четко структурирована, а поставленная задача, выводы и название — согласованы между собой.

8. При написании статьи следует обратить внимание на следующее:

- название рукописи должно быть конкретным, информативным и в то же время по возможности кратким;
- аннотация должна быть достаточно лаконичной (от 50 до 100 слов) и в то же время информативной, соответствовать содержанию статьи и показывать, что сделано в работе;
- ключевые слова должны быть подобраны так, чтобы вероятность нахождения статьи через поисковые системы была как можно выше;
- описание результатов, представленных на рисунках, должно включать в себя интерпретацию этой информации, а не сводиться к дублированию подрисуночных под-

писей или к простому описанию приведенных зависимостей. Например, вместо таких неинформативных фраз, как «На рис. 1 приведен график зависимости A от B . Из рисунка видно, что при возрастании B значение A монотонно уменьшается.», следует дать пояснение типа «Как видно из рис. 1, при возрастании B значение A монотонно уменьшается, что свидетельствует о том, что ...»;

— выводы (заключение) не должны повторять аннотацию — в них нужно привести результаты работы (а не краткое содержание статьи). Правильно сформулировать выводы помогут такие фразы, как «Проведенное исследование показало, что ...», «Разработанная методика позволяет ...», «Авторами установлено, что...» и др.

9. Список «Использованные источники» (образец см. на сайте) формируется в порядке их упоминания в тексте. При этом нужно иметь в виду следующее:

— обязательно наличие ссылок на статьи и монографии последних лет, в том числе зарубежных авторов;

— не рекомендуется включать в список литературы ссылки на такие нормативные документы, как указы, акты и т. п. — если без этого нельзя обойтись, лучше упомянуть их непосредственно в тексте статьи;

— желательно избегать ссылок на труднодоступные публикации или на недолговечные Интернет-источники;

— при ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует указывать не только саму книгу, но и страницу (например, [2, с. 418]);

10. Тематическую информацию (название, ФИО авторов, место работы, аннотацию и ключевые слова) для русскоязычной статьи нужно привести на украинском (по возможности) и английском языках в конце статьи. При этом англоязычная аннотация должна быть представлена в расширенном виде (до 250 слов) и отражать все структурные элементы статьи (актуальность темы, постановку задачи, описание решения, выводы и практическую значимость).

Для статей на английском языке приводится краткая аннотация (50–100 слов), а также перевод тематической информации на русский и украинский (по возможности).

11. Редакция не предъявляет жестких требований к объему статьи — главное, чтобы он был оправдан. Как правило, публикации в «ТКЭА» занимают от двух до шести журнальных страниц, что соответствует 5–15 страницам, набранным в текстовом редакторе Microsoft Word, шрифт Times New Roman, размер 12, междустрочный интервал 1,5.

12. При наборе текста статьи использование программ типа MathType допускается только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

13. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а терминология соответствовать общепринятой. Все использованные символы и аббревиатуры нужно пояснить при первом их упоминании в тексте.

14. С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи.

15. В начале статьи, кроме ее названия и информации об авторах (ФИО, ученые степени, место работы, e-mail), необходимо указать ее индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК).

16. Материалы статьи направляются по e-mail <tkea@optima.com.ua>. В тексте письма нужно указать ФИО авторов, название статьи и соответствующее тематическое направление (см. п. 2), а к письму прикрепить подписанные Авторское соглашение и Карточки автора (см. на сайте).

17. При цитировании статей из журнала «ТКЭА» его название на латинице должно быть представлено транслитерацией, а именно: «Tekhnologiya i Konstruirovane v Elektronnoi Apparatyre».

P.S. Для контроля выполнения требований к содержанию статьи авторы могут воспользоваться критериями, по которым рукопись будет оцениваться рецензентом (см. бланк рецензии на сайте).

К статье «Влияние электронного облучения на оптические свойства пленок нанокристаллического SiC на подложках из монокристалла Al_2O_3 »

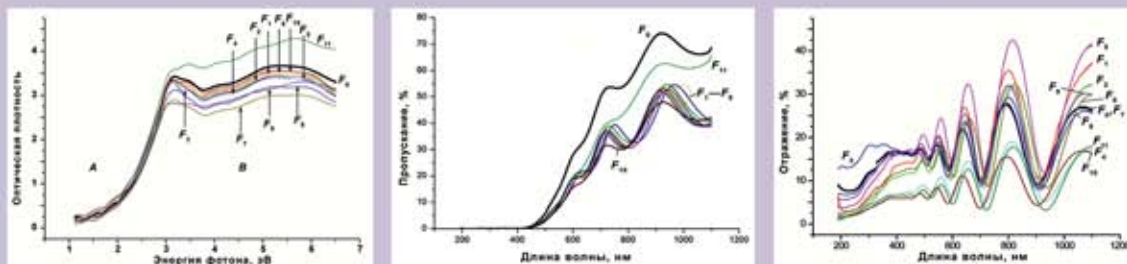


Рис. 1

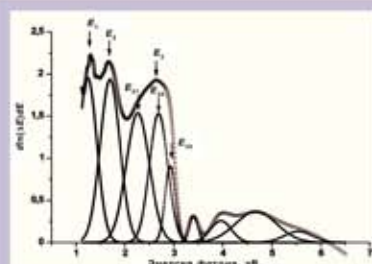


Рис. 2

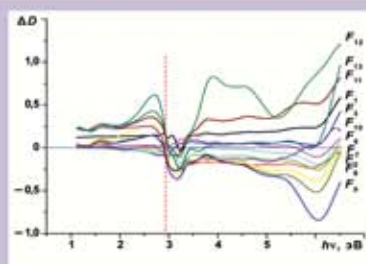


Рис. 3

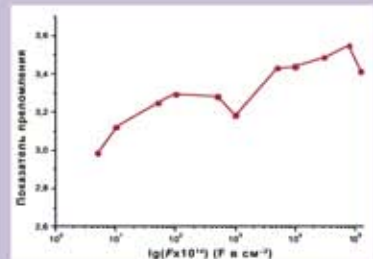


Рис. 4

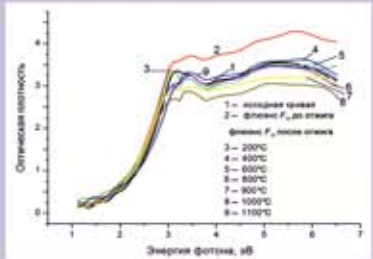


Рис. 5

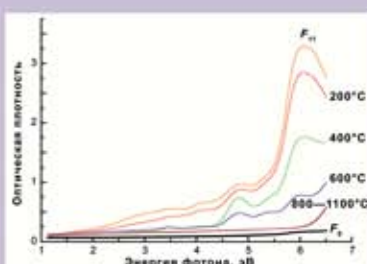
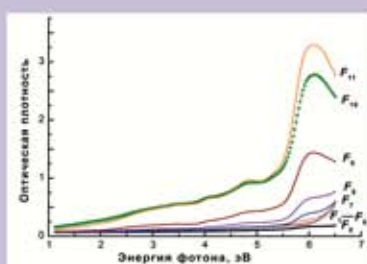


Рис. 6

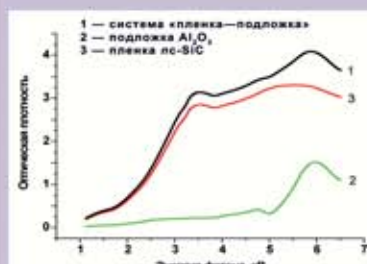


Рис. 7

Номер готовили
Киев, Львов, Одесса, Полтава,
Тирасполь, Харьков



Пишите
Подписывайтесь
Читайте