УДК 621.374 DOI https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.33

СХЕМОТЕХНІЧНА МОДЕЛЬ ОПТОПАРИ НА СТРУКТУРАХ ОРГАНІЧНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Григорій Барило
доктор технічних наук, професор кафедри електронної інженерії
Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, hryhorii.i.barylo@lpnu.ua
ORCID: 0000-0001-5749-9242

Роман Голякаф
доктор технічних наук, професор кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій
Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, roman.l.holiaka@lpnu.ua
ORCID: 0000-0002-7720-0372

Микола Брич
кандидат технічних наук, старший викладач кафедри телекомунікацій
Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, mykola.v.brych@lpnu.ua;
ORCID: 0009-0004-9767-5991

Олег Адам'як
аспірант кафедри електронної інженерії
Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, oleh.a.adamiak@lpnu.ua;
ORCID: 0000-0002-6290-6516

Юрій Шлюсар
аспірант кафедри електронної інженерії
Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, yurii.a.shliusar@lpnu.ua;
ORCID: 0009-0001-7849-4253

Оптопари на основі органічних структур відкривають широкі можливості для розробки нових сенсорних пристроїв. Їхні переваги, такі як низька вартість, можливість нанесення на різні підкладки (у т. ч. гнучкі) та висока чутливість до різних фізико-хімічних параметрів роблять їх перспективними для сенсорних застосувань у біотехнології, матеріалознавстві, медицині та моніторингу різних фізичних параметрів, однак широкому використанню органічних матеріалів перешкоджає їхня часова та температурна нестабільність. Розробка параметричної SPICE-моделі оптрона на основі органічних електронних структур і дослідження впливу нестабільності на перетворення сигналу в сенсорних пристроях може стати ключем до вирішення цієї проблеми. Використання спеціалізованих програмних засобів, зокрема Micro-Cap, дозволяє досліджувати параметри оптронів, візуалізувати результати досліджень у графічному та табличному вигляді, а також оптимізувати параметри SPICE-моделі для кращого узгодження з експериментальними даними. Компенсація дрейфу параметрів оптопари може бути виконана за допомогою трансімпедансного перетворення сигналу. Цей метод дозволяє зменшити вплив дрейфу параметрів на характеристики сенсорних пристроїв, підвищити точність і надійність сенсорних пристроїв, а також розширити сферу застосування сенсорних пристроїв на основі органічних матеріалів. Запропонований варіант побудови параметричної SPICE-моделі оптопари, яка досліджує процеси перетворення сигналу, а також метод компенсації нестабільності параметрів оптопари з використанням трансімпедансного перетворення сигналу. Результати досліджень показали ефективність запропонованого методу компенсації нестабільності параметрів оптронів. Наукова новизна роботи полягає у розробці параметричної SPICE-моделі на основі структур органічної електроніки, яка враховує вплив нестабільності параметрів. Практич-

не значення роботи полягає в тому, що розроблені методи дослідження та моделювання оптронів можуть бути використані для створення сенсорних пристроїв на основі органічної електроніки з покращеними характеристиками.

Ключові слова: органічна електроніка, оптопара, SPICE-модель, імпедансна спектроскопія.

Актуальність роботи. Органічна електроніка є одним із найбільш перспективних напрямків розвитку сучасної інформаційно-комп'ютерної техніки. Переважна більшість задач зосереджені на розробці нових технологій органічної мікроелектроніки [1], синтезі нових органічних матеріалів [2] і структур на їх основі [3], однак часова та температурна нестабільність огранічних структур значною мірою перешкоджає більш широкому їх використанню у пристроях електроніки [4]. Для аналізу процесів органічних структур, зокрема з метою визначення механізмів часової та температурної нестабільності, використовують методи математичного моделювання та параметричні моделі, які здебільшого ситезуються у виді електричних схем заміщення [5]. Висока інформативність аналізу процесів деградації досягається комплексним дослідженням органічних структур, зокрема методом імпедансної спектроскопії (Impedance Spectroscopy). У літературі описані результати використання такого методу, зокрема в задачах вимірювання параметрів структур OLED [6] і фотовольтаїки [7; 8].

У роботі розглядаються задачі розроблення засобів комплексного дослідження параметрів оптопар на структурах органічної електроніки. Проблематика формування таких оптопар, дослідження їх параметрів і застосування у сенсорній електроніці розглядається, зокрема, в [9; 10]. У статті представлено параметричну SPICE модель оптопари у програмному середовищі Micro-Cap, яка забезпечує проведення комплексних досліджень процесів сигнального перетворення з використанням методів імпедансної спектроскопії.

Матеріал і результати досліджень. Задача розроблення методики моніторингу дрейфу параметрів сенсорної оптопари безпосередньо в колах сигнального перетворення сенсорного пристрою вимагає синтезу відповідної макромоделі. Макромодель OCS MODEL складається з модулів, що описують процеси у випромінювачі світлового потоку (світлодіоді) – S_LED, фотосенсорі (фотодіоді чи фоторезисторі) – S_PHD та оптичному середовищі чи активному шарі оптосенсора – S_SEN. Крім того, в макромодель входять модулі, що описують самонагрів структури оптопари – S_HTQ та часовий дрейф S_NOS. Кожен із вказаних модулів представляється схемами заміщення з електричних компонентів відповідно до принципу функціональної аналогії. Уніфікований варіант схем заміщення цих модулів разом із вбудованою системою контролера (Embedded System Controller) з розширеними функціями формування інформативних сигналів дрейфу параметрів оптопари представлено на рис. 1. Залежно від задач і специфіки кожної окремої задачі моделювання такий уніфікований варіант може доповнюватися іншими компонентами. Зокрема, при параметричному аналізі сигнального перетворювача останній представляється реальними електричними схемами живлення, підсилення, трансімпедансного перетворення тощо, а модулі макромоделі OCS MODEL доповнюються специфічними для конкретного аналізу компонентами. Зокрема, може змінюватися кількість RC кіл модуля самонагріву S_HTQ чи кількість джерел шуму модуля часового дрейфу S_NOS.

Комплексні дослідження оптопар базуються на формуванні розширеного набору інформативних сигналів, які отримують поєднанням методів трансімпедансного перетворення й імпедансної спектроскопії. На основі цих сигналів встановлюють характерні закономірності дрейфу параметрів оптопар і проводять корекцію коефіцієнтів із використанням математичної макромоделі вимірювального перетворення.

Апаратна реалізація вбудованої системи OCS ES (Opto Coupler Structure Embedded System) комплексного дослідження органічних оптопар виконана на основі програмованої системи на кристалі PSoC (Programmable System on Chip) серії PSoC 5LP (Cypres – Infineon Technologies). Для формування і візуалізації імпедансних характеристик розроблено програмне забезпечення RPSoC Control.

До складу PSoC 5LP входять мікропроцесор, багатофункціональні модулі аналогового та цифрового перетворення сигналів, модулі пам'яті, інтерфейси та ряд інших важливих для концепції програмованої системи вузлів. З погляду реалізації змішаного сигнального перетворення в сенсорній техніці перевагою вищезгаданого

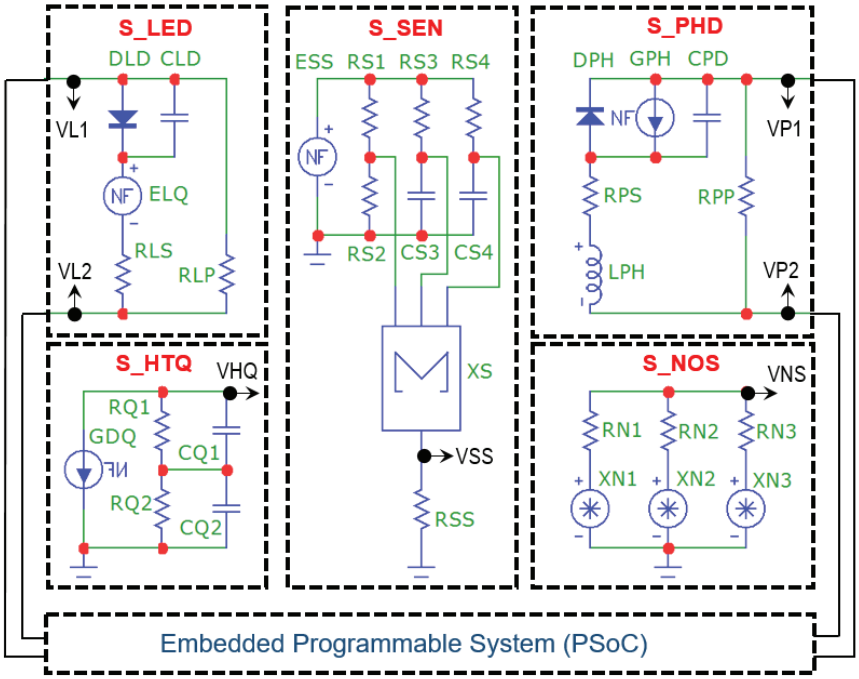

Рис. 1. Уніфікований варіант схеми заміщення макромоделі OCS

сімейства PSoC 5LP є широкий набір програмно керованих аналогових компонентів, режими роботи яких конфігуруються при їх ініціалізації та програмно керуються з допомогою API (Application Programming Interface).

Основними компонентами PSoC розробленої системи OCS ES (рис. 2) є такі вбудовані елементи.

Операційні підсилювачі Opamp із колами зворотних зв'язків, що комутуються аналоговими мультплексорами AMux і реалізують широкий набір режимів підсилення та функціонального перетворення. Трансімпедансний підсилювач TIA, що формує вхідне коло фотодіоного перетворення із програно-конфігурованим RC колом зворотного зв'язку. Формувач сигналів керування світлодіодами, що реалізовано на таймері Timer, регістрі керування ControlReg і синтезаторі форми WaveDAC. Компаратор Comp, що використовується для керування функціональним перетворенням сигналів. Джерела опорної напруги Vref, які використовуються для формування рівнів компарування сигналів і зміщення постійного рівня підсилювачів і функціональних перетворювачів. Цифро-аналоговий перетворювач VDA, вихідна напруга якого формує постійні зміщення чи масиви задаючих сигналів, зокрема при вимірюванні ВАХ (вольт-амперної характеристики) досліджуваних OLED структур. Набір аналого-цифрових перетворювачів, зокрема швидкодіючого SAR (Successive Approximation Register) і прецизійного DelSig (Delta-Sigma) типів. Сигнальний перетворювач ємності CapSense, що використовується для вимірювання електричної ємності досліджуваних структур. Універсальний асинхронний інтерфейс UART для передавання даних між вбудованою системою та програмним забезпеченням на персональному комп'ютері.

Вид основних вікон програмного забезпечення RPSoC Control і приклади результатів дослідження представлені на рис. 3.

Керування процесом дослідження характеристик передбачає керування формою й амплітудою імпульсів активації OLED, встановлення коефіцієнтів підсилення сигналів і кількості інтервалів інтегрування, формування та графічне представлення масивів даних вимірювання. Зокрема, на верхній діаграмі представлено процес формування сигналу на інтеграторі квадратурного детектора, а на нижніх – частотні залежності дійсної SRE та уявної SIM складових частин імпедансу.

Розглянута вбудована система OCS ES апробована у дослідженнях параметрів оптопари, в якій світловипромінююча структура реалізована на гетеропереході на основі похідних карбазолу ITO/THCA/TCz1/Ca/Al та фотоперетворювача на основі пентацену та похідних перилену – ITO/пентацен/DiMe-PTCDI/Al (рис. 4).

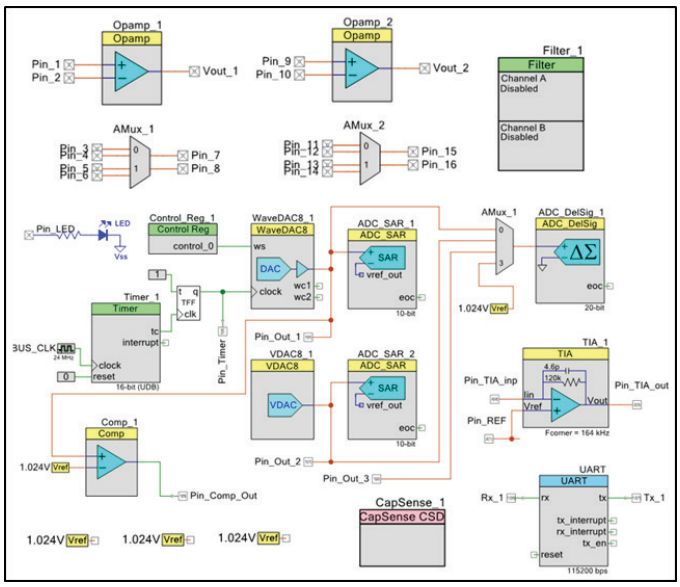

Рис. 2. Компоненти PSoC OCS ES

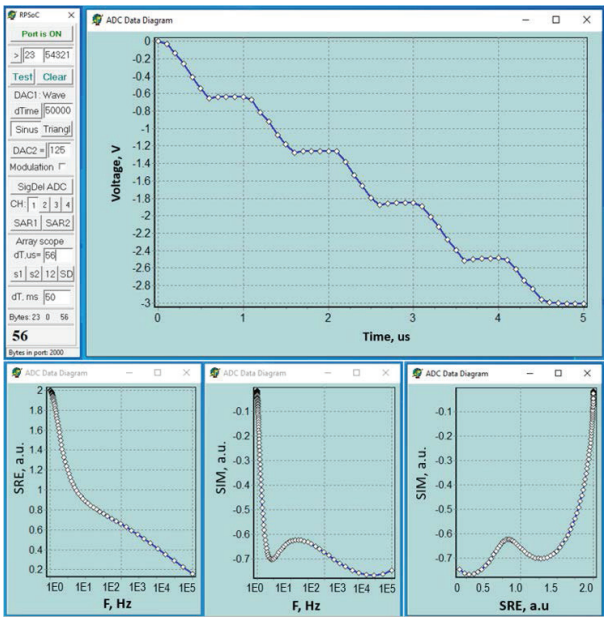

Рис. 3. Вікна програмного забезпечення RPSoC Control і приклади результатів дослідження

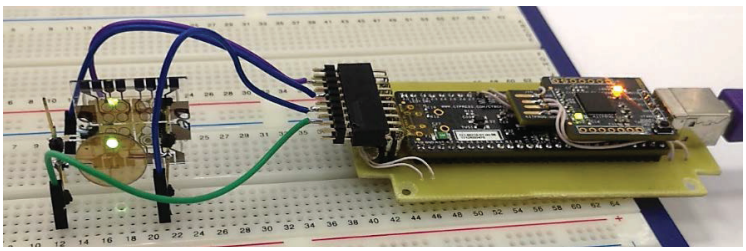

Рис. 4. Фото макету вбудованої системи PSoC OCS ES

Висновки. Показано, що комплексні дослідження оптопар базуються на формуванні розширеного набору інформативних сигналів, які отримують поєднанням методів трансімпедансного перетворення й імпедансної спектроскопії. Для проведення таких досліджень у роботі вирішена задача розроблення схеми заміщення SPICE макромоделі та моніторингу параметрів сенсорної оптопари безпосередньо у колах сигнального перетворення сенсорного пристрою.

Отриманий набір сигналів дійсної ZRE та уявної ZIM складових частин імпедансу використовується для аналізу дрейфу параметрів оптопар і дає можливість корегувати коефіцієнти сигнального перетворення з використанням вбудованої системи контролю. Завдяки такому підходу забезпечується збільшення терміну експлуатації органічних структур і підвищення точності вихідних результатів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Takeya J., Uno M. Technology development for printed LSIs based on organic semiconductors. *Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers*, Honolulu, HI, USA, 2014, P. 1–4. https://doi/org/10.1109/VLSIC.2014.6858358.
2. Chen Y., Liu Y., Hu Y. Selective Doping of a Single Ambipolar Organic Semiconductor for Device Fabrication. *IEEE International Flexible Electronics Technology Conference (IFETC)*, Qingdao, China, 2022. P. 1–2. https://doi/org/10.1109/IFETC53656.2022.9948510.
3. Idman E., Idman E., Yildirim O. Gaussian Applications in Organic Structured Electronic Systems. *International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA),* Ankara, Turkey, 2020. P. 1–3. https://doi/org/10.1109/HORA49412.2020.9152921.
4. Jassi M., Gurunath R., Iyer S.S.K. Degradation Study of Organic Semiconductor Devices Under Electrical and Optical Stresses. *Electron Device Letters.* 2008. Vol. 29. № 5. P. 442–444. https://doi/org/10.1109/LED.2008.920978.
5. Ramesh R. Navan DC & transient circuit simulation methodologies for organic electronics. *2nd International Workshop on Electron Devices and Semiconductor Technology*, Mumbai, India. 2009. P. 1–4. https://doi/org/10.1109/EDST.2009.5166122.
6. Lee G. W., Kim H., Park J., Shim J. I., Shin D. S. Investigation of Luminance Degradation in Organic Light-Emitting Diodes by Impedance Spectroscopy. *Photonics Technology Letters*. 2018. Vol. 30. № 13. P. 1183–1185. https://doi/org/10.1109/LPT.2018.2838099.
7. Delpozo G., Martín-Martín D., Arredondo B., Paniagua M., Romero B., Apilo P. Analyzing Outdoor Degradation of Flexible PEDOT-Free P3HT; PCBM Organic Solar Cells Using Impedance Spectroscopy. *Spanish Conference on Electron Devices (CDE)*, Salamanca, Spain. 2018. P. 1–4. https://doi/org/10.1109/CDE.2018.8596929.
8. Барило Г., Микитюк З., Кремер І., Качурак Ю., Барило Н. Дослідження тривалості перехідних процесів під час взаємодії суміші рідких кристалів з випарами летких органічних сполук. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.* 2022. Вип. 2 (132). С. 212–217. https://doi/org/10.32782/1995-0519.2022.1.28.
9. Li D., Dong G., Duan L., Zhang D., Wang L., Qiu Y. High-Performance Organic Optocouplers Based on an Organic Photodiode With High Blue Light Sensitivity. *Electron Device Letters*. 2013. Vol. 34. № 10. P. 1295–1297. https://doi/org/10.1109/LED.2013.2274522.
10. Li D., Li W., Duan L., Zhang G., Liu S. Dong, G. Highly Integrable Organic Optocouplers on a Patterned Double-Side Indium Tin Oxide Substrate With High Isolation Voltage. *Electron Device Letters.* 2015. Vol. 36. № 2. P. 171–173. https://doi/org/10.1109/LED.2014.2379276.

CIRCUIT MODEL OF AN OPTOCOUPLER BASED ON ORGANIC ELECTRONICS STRUCTURES

Hryhorii Barylo
Doctor of Engineering,
Professor at the Department of Electronic Engineering
Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013, hryhorii.i.barylo@lpnu.ua
ORCID: 0000-0001-5749-9242

Roman Holiaka
Doctor of Engineering,
Professor of the Department of Electronic Means of Information and Computer Technologies
Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013, roman.l.holiaka@lpnu.ua
ORCID: 0000-0002-7720-0372

Mykola Brych
Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Telecommunications
Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013, mykola.v.brych@lpnu.ua
ORCID: 0009-0004-9767-5991

Oleh Adamiak,
Postgraduate Student at the Department of Electronic Engineering
Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013, oleh.a.adamiak@lpnu.ua
ORCID: 0000-0002-6290-6516

Yurii Shliusar
Postgraduate Student at the Department of Electronic Engineering
Lviv Polytechnic National University, 12 S. Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013, yurii.a.shliusar@lpnu.ua
ORCID: 0009-0001-7849-4253

Optocouplers based on organic structures open up great opportunities for the development of new sensor devices. Their advantages, such as low cost, the ability to be applied to various substrates (including flexible ones), and high sensitivity to various physical and chemical parameters, make them promising for sensor applications in biotechnology, materials science, medicine, and monitoring of various physical parameters. However, the widespread use of organic materials is hindered by their time and temperature instability. The development of a parametric SPICE model of an optocoupler based on organic electronics structures and the study of the effect of instability on signal conversion in sensor devices can be the key to solving this problem. The use of dedicated software tools, in particular Micro-Cap, allows for the study of optocoupler parameters, visualization of research results in graphical and tabular form, and optimization of SPICE model parameters for better agreement with experimental data. Compensation of the optocoupler parameter drift can be performed using a transimpedance signal conversion. This method allows to reduce the influence of parameter drift on the characteristics of sensor devices, to improve the accuracy and reliability of sensor devices, and to expand the scope of application of sensor devices based on organic materials. The paper proposes a variant of constructing a parametric SPICE-model of an optocoupler that investigates the processes of signal conversion, as well as a method of compensating for the instability of optocoupler parameters using a transimpedance signal conversion. The research results showed the efficiency of the proposed method of compensating for the instability of optocoupler parameters. The scientific novelty of the work lies in the development of a parametric SPICE-model based on organic electronics structures that takes into account the influence of parameter instability. The practical significance of the work is that the developed methods of research and modeling of optocouplers can be used to create sensor devices based on organic electronics with improved characteristics.

Key words: organic electronics, optocoupler, SPICE-model, impedance spectroscopy.

REFERENCES

1. Takeya, J., & Uno, M. (2014). Technology development for printed LSIs based on organic semiconductors. In 2014 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers (pp. 1–4). Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. https://doi/org/10.1109/VLSIC.2014.6858358.

2. Chen, Y., Liu, Y., & Hu, Y. (2022). Selective doping of a single ambipolar organic semiconductor for device fabrication. In 2022 IEEE International Flexible Electronics Technology Conference (IFETC) (pp. 1–2). Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. https://doi/org/10.1109/IFETC53656.2022.9948510.

3. Idman, E., Idman, E., & Yildirim, O. (2020). Gaussian applications in organic structured electronic systems. In 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA) (pp. 1–3). Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. https://doi/org/10.1109/HORA49412.2020.9152921.

4. Jassi, M., Gurunath, R., & Iyer, S.S.K. (2008). Degradation study of organic semiconductor devices under electrical and optical stresses. IEEE Electron Device Letters, 29(5), 442–444. https://doi/org/10.1109/LED.2008.920978.

5. Ramesh, R. Navan (2009). DC & transient circuit simulation methodologies for organic electronics. In 2009 2nd International Workshop on Electron Devices and Semiconductor Technology (pp. 1-4). Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. https://doi/org/10.1109/EDST.2009.5166122.

6. Lee, G.W., Kim, H., Park, J., Shim, J.I., & Shin, D.S. (2018). Investigation of luminance degradation in organic light-emitting diodes by impedance spectroscopy. IEEE Photonics Technology Letters, 30(13), 1183–1185. https://doi/org/10.1109/LPT.2018.2838099.

7. Delpozo, G., Martín-Martín, D., Arredondo, B., Paniagua, M., Romero, B., & Apilo, P. (2018). Analyzing outdoor degradation of flexible PEDOT-free P3HT; PCBM organic solar cells using impedance spectroscopy. In 2018 Spanish

Conference on Electron Devices (CDE) (pp. 1–4). Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. https://doi/org/10.1109/CDE.2018.8596929.

8. Barylo, H., Mykytiuk, Z., Kremer, I., Kachurak, Y., & Barylo, N. (2022). Doslidzhennia tryvalosti perekhidnykh protsesiv pid chas vzaiemodii sumishi ridkykh krystaliv z vyparamy letkykh orhanichnykh spoluk *[Study of the duration of transient processes during the interaction of a mixture of liquid crystals with vapors of volatile organic compounds]*. Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhayla Ostrohradskoho, 2(139), 196–202. [in Ukrainian].

9. Li, D., Dong, G., Duan, L., Zhang, D., Wang, L. & Qiu, Y. (2013). High-performance organic optocouplers based on an organic photodiode with high blue light sensitivity. IEEE Electron Device Letters, 34(10), 1295–1297. https://doi/org/10.1109/LED.2013.2274522.

10. Li, D., Li, W., Duan, L., Zhang, G., Liu, S. & Dong, G. (2015). Highly integrable organic optocouplers on a patterned double-side indium tin oxide substrate with high isolation voltage. IEEE Electron Device Letters, 36(2), 171–173. https://doi/org/10.1109/LED.2014.2379276.

Стаття надійшла 26.02.2024