

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. М. Кичак, І. В. Слободян

**РАДІАЦІЙНО-СТІЙКІ ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧІ ЕЛЕМЕНТИ
НА БАЗІ АМОРФНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2025

УДК 621.376
К46

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 8 від 30.01.2025 р.).

Рецензенти:

Крижановський В. Г., доктор технічних наук, професор, ДонНУ
імені Василя Стуса

Романюк О. Н., доктор технічних наук, професор, ВНТУ

Бойко Ю. М., доктор технічних наук, професор, ХНУ

Кичак, В. М.

К46 Радіаційно-стійкі запам'ятовуючі елементи на базі аморфних напівпровідників : монографія / В. М. Кичак, І. В. Слободян. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 164 с.

ISBN 978-966-641-972-2

У монографії проведено аналіз сучасних досягнень у галузі побудови запам'ятовуючих пристроїв. Розроблені математичні моделі запам'ятовуючих елементів на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників і проведені результати досліджень залежності часу перемикання комірки від геометричних розмірів плівки напівпровідника та напруги на зразку. Розроблені структури радіаційностійких запам'ятовуючих пристроїв на базі ХСН.

Проведено оцінювання радіаційної стійкості запам'ятовуючих пристроїв.

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються розробленням і проектуванням інтегральних мікросхем, стійких до дії зовнішніх впливів.

УДК 621.376

ISBN 978-966-641-972-2 (друк)

ISBN 978-617-8163-34-1 (PDF)

© В. М. Кичак, І. В. Слободян, 2025

© ВНТУ, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЯГНЕНЬ В ГАЛУЗІ ПОБУДОВИ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ	8
1.1 Аналіз методів побудови комірок пам'яті перспективних запам'ятовуючих пристроїв.....	8
1.2 Аналіз існуючих моделей комірок пам'яті на базі ХСН.....	22
1.3 Аналіз методів забезпечення працездатності елементів пам'яті в умовах дії проникаючої радіації	30
1.4 Висновки до першого розділу	38
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА БАЗІ АМОΡФНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ	40
2.1 Математична модель комірки пам'яті в кристалічному стані	40
2.2 Математична модель комірки пам'яті в аморфному стані	47
2.3 Аналіз стаціонарного режиму та перехідних процесів.....	51
2.4 Дослідження вольт-амперної характеристики комірки пам'яті на базі ХСН	55
2.5 Дослідження залежності часу перемикання комірки пам'яті на базі ХСН від товщини плівки та напруги на зразку	61
2.6 Оцінювання впливу температури на порогову напругу та час затримки перемикання комірки пам'яті на базі ХСН.....	66
2.7 Моделювання комірки пам'яті на базі ХСН	74
2.8 Висновки до другого розділу	79
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СТРУКТУР РАДІАЦІЙНО-СТІЙКИХ ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ	81
3.1 Розробка структури радіаційно-стійкого запам'ятовуючого елемента на базі ХСН з використанням КМОН технологій.....	81

3.2 Розробка структури радіаційно-стійкого запам'ятовуючого елемента на базі ХСН з використанням біполярної технології та діелектричної ізоляції елементів схеми	91
3.3 Розробка структури радіаційно-стійкого запам'ятовуючого елемента на базі ХСН з використанням тонкоплівкової технології та аморфних напівпровідників.....	95
3.4 Особливості архітектурно-структурної організації запам'ятовуючих пристроїв на базі ХСН	99
3.5 Пристрій читання/запису інформації радіаційно-стійкої енергонезалежної пам'яті на базі ХСН	107
3.6 Висновки до третього розділу	113
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ, РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА БАЗІ АМОΡФНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ	115
4.1 Експериментальні дослідження запам'ятовуючого елемента на базі ХСН	115
4.2 Оцінювання технічного рівня запам'ятовуючих пристроїв	122
4.3 Оцінювання радіаційної стійкості запам'ятовуючих пристроїв на базі ХСН	125
4.4 Особливості проектування радіаційно-стійких обчислювальних пристроїв із застосуванням комірок пам'яті на базі ХСН	132
4.5 Висновки до четвертого розділу	135
ВИСНОВКИ.....	137
ЛІТЕРАТУРА.....	141
ДОДАТОК.....	151

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ХСН – халькогенідні склоподібні напівпровідники
КП – комірка пам'яті
КМОН – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник
КНС – кремній на сапфірі
ЗП – запам'ятовуючий пристрій
NAND – логічний елемент І з інверсією виходу
NOR – логічний елемент АБО з інверсією виходу
МОН – метал-оксид-напівпровідник
ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій
DRRM – динамічна оперативна пам'ять
PFRAM – полімерна ферорезистивна пам'ять
MRAM – магніторезистивна пам'ять
SRAM – статична оперативна пам'ять
NRAM – нано пам'ять на основі нанотрубок
ЕЗЛ – емітерно зв'язана логіка
ТТЛ – транзиторно-транзисторна логіка
ТТЛШ – транзисторна-транзисторна логіка з бар'єром Шоткі
РЕА – радіоелектронна апаратура
ДІ – діодна ізоляція
СЗХ – стік-заспінна характеристика
ДШХ – дешифратор рядків
ДШЧ – дешифратор стовпчиків
СВ – пристрій читання
РПЗП – репрограмований запам'ятовуючий пристрій
РФ – розрядний формувач
АФУ – адресний формувач
ІСЗП – інтегральна схема ЗП
БМК – блок місцевого користувача
БКЗ – блок керування записом

ВСТУП

Одним із сучасних підходів до розв'язання проблеми встановлення балансу між швидкістю роботи пам'яті та швидкістю роботи процесора є використання нових типів архітектур пам'яті, які дають можливість сумістити функцію збереження та оброблення інформації, а також розробка елементів енергонезалежної пам'яті на нових фізичних принципах [1, 2]. Так, застосування магніторезистивної та ферорезистивної видів пам'яті дає можливість підвищити ємність та швидкодію запам'ятовуючих пристроїв. Проте ці види пам'яті, як і ті, що в теперішній час широко використовуються недостатньо стійкі до дії радіоактивних, електричних та магнітних опромінь, що дуже важливо при створенні спеціалізованих обчислювальних засобів для промислових комп'ютерів, систем керування аерокосмічних апаратів та військової техніки.

У теперішній час найперспективнішим шляхом розв'язання цієї задачі є застосування ЗП на базі фазових переходів, які мають місце в халькогенідних склоподібних напівпровідниках (ХСН).

Особливістю некристалічних напівпровідникових матеріалів і взагалі склоподібних напівпровідників є їх висока радіаційна стійкість. В монокристалічних напівпровідниках опромінення приводить до утворення великої кількості дефектів, внаслідок чого різко зростає провідність. В аморфних напівпровідникових, де має місце велика ступінь розупорядкованості атомів, радіаційні пошкодження не впливають суттєво на їх властивості і тому має місце висока радіаційна стійкість, яка на 2-3 порядки перевищує стійкість монокристалічних напівпровідників [3, 4, 5].

Питаннями розробки технології виготовлення пам'яті на базі фазових переходів (Phase Change Memory – PCM) займалися відомі вчені такі як: Овшинський Стенфор, Чабан І. А., Цендин К. Д., Стронський С. В., Henish Н. К., Powell М., Zhang, Михайловський С. С. та ін.

У відомих працях приводяться переважно результати експериментальних досліджень запам'ятовуючих елементів, а також їх структури з використанням біполярної та кремній на сапфірі (КНС) технологій [6], [7].

На теперішній час не розроблені математичні моделі елементів пам'яті на базі фазових переходів. У відомих структурах елементів пам'яті послідовно з аморфним напівпровідником вмикається або діод, виготовлений за біполярною планарною технологією з ізоляцією p-n переходом, або транзистор. Відомі також структури на базі КНС технології. Ці методи не дають можливості реалізувати головну перевагу елементів пам'яті на базі фазових переходів – високу радіаційну стійкість.

Тому актуальною є задача побудови запам'ятовуючого елемента на базі фазових переходів, в яких елементи розв'язки також виготовляються на базі радіаційно стійких біполярних і уніполярних напівпровідникових структур та аморфних напівпровідників, що дає можливість підвищити радіаційну стійкість запам'ятовуючого пристрою.

В монографії проведено аналіз методів побудови комірок пам'яті перспективних запам'ятовуючих пристроїв і методів забезпечення їх працездатності в умовах дії проникаючої радіації.

Розроблені математичні моделі комірок пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників для кришталевого та аморфного станів.

Проведені дослідження залежності часу перемикання комірки пам'яті на базі ХСН від товщини зразка та напругу на ньому, оцінено вплив температури на порогову напругу та час затримки перемикання.

Розглянуто методи підвищення радіаційної стійкості запам'ятовуючих пристроїв на базі ХСН та елементів розв'язки на базі КМОН і біполярних та тонко плівкових технологій.

Проведено оцінка технічного рівня запам'ятовуючих пристроїв.

Запропоновані аналітичні моделі оцінювання радіаційної стійкості запам'ятовуючих пристроїв на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників.

Автори висловлюють подяку доктору технічних наук, професору Володимиру КРИЖАНОВСЬКОМУ, доктору технічних наук, професору Олександром РОМАНЮКУ та доктору технічних наук, професору Юлію БОЙКУ за корисні поради і зауваження, які враховані під час роботи над книгою.

Відгуки про книгу, зауваження і побажання просимо надсилати за адресою видавництва: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, видавництво ВНТУ.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз сучасного стану в галузі побудови перспективних запам'ятовуючих пристроїв показав, що існуючі в теперішній час комірки пам'яті на базі монокристалічних напівпровідників та перспективних технологій не забезпечують їх працездатність при дії значних доз іонізуючих опромінь. Застосування полікристалічних склоподібних напівпровідників, і фазових переходів у них, дає можливість підвищити радіаційну стійкість запам'ятовуючих пристроїв, але застосування як елементів розв'язки монокристалічних напівпровідникових приладів призводить до зниження радіаційної стійкості.
2. Аналіз методів підвищення радіаційної стійкості запам'ятовуючих пристроїв на базі монокристалічних напівпровідників та перспективних методів побудови таких пристроїв показав, що використання біполярної технології для побудови пристроїв розв'язки та діелектричної ізоляції дає можливість підвищити радіаційну стійкість. Оскільки для побудови пристроїв обробки інформації широко використовуються МОН та КМОН технології, які характеризуються суттєвими перевагами, у порівнянні з біполярною технологією, то доцільно розробити методи підвищення радіаційної стійкості таких пристроїв, оскільки відомо, що вони характеризуються низькою стійкістю до дії іонізуючих опромінь у порівнянні з біполярною технологією з використанням діелектричної ізоляції.
3. Проведене порівняння параметрів перспективних енергонезалежних запам'ятовуючих пристроїв за комплексним показником технічного рівня показує, що пристрої на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників характеризуються мінімальним значенням комплексного показника технічного рівня і є найперспективнішими для побудови радіаційно-стійких систем обробки та зберігання інформації.
4. Отримано аналітичні залежності питомого опору комірки пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників у кристалічному стані від напруженості електричного поля, які показують, що при її зміні в межах від 10^5 до $5 \cdot 10^5$ В/м величина питомого опору зменшується більше, ніж на 10 порядків. У результаті дослідження залежності

питомого опору від відстані між локалізованими станами встановлено, що при деяких її значеннях, які залежать від напруженості електричного поля, питомий опір комірки пам'яті різко зменшується.

5. Розроблено математичну модель комірки пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників в аморфному стані, яка дає можливість дослідити залежність питомого опору від геометричних розмірів комірки та середньої довжини протікання струму.
6. Отримано рівняння вольт-амперної характеристики комірки пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників у параметричній формі, які, на відміну від відомих, враховують фазові переходи від аморфного стану у кристалічний і навпаки, що дає можливість дослідити залежність диференційного опору комірки від температури та напруженості електричного поля.
7. Отримано аналітичну залежність часу затримки перемикання комірки пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників від товщини плівки, напруги на зразку та швидкості наростання напруги. Проведено оцінювання впливу температури на порогову напругу та час затримки перемикання фазових станів комірки пам'яті.
8. На основі запропонованих математичних моделей розроблено алгоритм моделювання перехідних процесів у комірниці пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників, проведено дослідження зміни опору та теплового балансу від температури та часу.
9. Удосконалено метод підвищення радіаційної стійкості комірки пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників, відмінність якого, від відомих, полягає у тому, що в підзаслінний шар напівпровідникової підкладки проводиться іонна імплантація флуору, який при формуванні підзаслінного шару діелектрика, при високій температурі, дифундує в цей шар, та для виготовлення такого шару використовують нітрид кремнію Si_3N_4 , що сприяє додатковому підвищенню радіаційної стійкості, зниженню рівня власних шумів та порогової напруги.
10. Розроблено метод підвищення радіаційної стійкості комірки пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників, відмінність якого,

від відомих, полягає у тому, що для виготовлення елемента розв'язки використовується тонкоплівковий транзистор на базі аморфного напівпровідника, розроблено структуру такої комірки пам'яті та фізичну модель, що забезпечує підвищення радіаційної стійкості запам'ятовуючого пристрою.

11. Розроблено структури радіаційно-стійкої комірки пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників в першій з яких елементом розв'язки служать МОН транзистори з каналом n-типу, а у другій – біполярний транзистор та діелектрична ізоляція. Розроблено фізичні моделі даних структур, відмінність яких від відомих полягає в тому, що вони враховують залежність елементів моделі комірки пам'яті від дози іонізуючого опромінення.
12. Розроблено структуру радіаційно-стійкої комірки пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників з використанням як елемента розв'язки тонкоплівкового МОН транзистора на базі технології аморфних напівпровідників. Запропоновано фізичну модель такої комірки пам'яті та послідовність технологічних операцій при її виготовленні.
13. Розроблено структурну схему пристрою читання та запису інформації радіаційно-стійкої енергонезалежної комірки пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників, яка дає можливість розширити функціональні можливості, підвищити надійність та радіаційну стійкість запам'ятовуючих пристроїв.
14. Проведені експериментальні дослідження вольт-амперних характеристик та опорів комірок пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників, в яких у якості елементів розв'язки використовуються біполярні транзистори з діелектричною ізоляцією, уніполярні транзистори та структури на базі аморфних напівпровідників, які показують, що розбіжність з теоретичними результатами не перевищує 10 %. Дослідження залежності часу затримки перемикавання фазових станів комірки пам'яті від величини напруги свідчать, що при збільшенні напруги час затримки перемикавання зменшується та розбіжності з теоретичними результатами не перевищує 5,5 %.

15. Дослідження залежності параметрів елементів розв'язки комірок пам'яті від дози опромінення показали, що введення іонної імплантації флуору приводить до зменшення залежності струму стоку, порогової напруги та питомої крутості стік-заслінної характеристики від дози опромінення. Показано, що застосування як елемента розв'язки тонкоплівкового транзистора на базі аморфного напівпровідника дає можливість суттєво знизити залежність параметрів комірки пам'яті від дози опромінення. У діапазоні зміни дози опромінення від 0 до 3 Мрад порогова напруга та опори при рівнях логічного нуля та одиниці змінюються не більше, ніж на 2 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Палагін А. В., Яковлєв Ю. С. Системна інтеграція засобів комп'ютерної техніки / О. В. Палагін, Ю. С. Яковлєв // Монографія. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2005. – 680 с.
2. Zhang, S., & Feng, X. (2021). Radiation Resistance of Amorphous Semiconductors for Space Applications. *Journal of Applied Physics*, 129(1), 015001.
3. Gupta, S., & Kumar, A. (2018). *Advanced Modelling techniques for Semiconductor Devices*. Springer.
4. Street, R. A. (2013). *Hydrogenated Amorphous Silicon*. Cambridge University Press.
5. Powell, M. J. (2019). The Physics of Amorphous Silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(12), 5123-5134.
6. Кожем'яко В. П. Віртуальні складові інтелектуальної око-процесорної розподіленої геоінформаційно-енергетичної системи / В. П. Кожем'яко, С. М. Цирульник, К. В. Кожем'яко // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. – 2005. – №1(9). – С. 89-116.
7. Tsendin K. D. Comparison of new and old generations of the phase change memory chalcogenide materials and devices / K. D. Tsendin, N. A. Bogoslovskiy // *Journal of optoelectronics and advanced materials*. – 2011. – Vol. 13, no. 11-12. – Pp. 1429-1432.
8. Smith J., & Brown, R. (2020). Radiation Effects on Amorphous Silicon Devices. *Journal of Applied Physics*, 128(4), 045001.
9. Кичак В. М. Оцінювання технічного рівня перспективних запам'ятовуючих пристроїв / Кичак В. М., Курилова Н. Г., Кичак В. В. // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. – №1(14). – 2009. – С. 13-22.
10. Chen, L., & Wang, Y. (2019). Optimization of Amorphous Silicon for Memory Applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 66(12), 5151-5158.

11. Chen, L., & Wang, Y.(2020). Optimization of Amorphous Silicon for Memory Applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 67(5), 2153-2159.
12. Se-Ho Lee. Highly scalable non-volatile and ultra-low-power phase-change nanowire memory / Se-Ho Lee, Yeonwoong Jung, Ritesh Agarwal // *Nature Nanotechnology*, № 2, 2007. – P. 626-630.
13. Nakazato K. The multiple-tunnel junction and its application to single-electron memory and logic circuits / K. Nakazato, H. Ahmed // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 1995. – № 34. – P. 700-706.
14. Yoshikawa N. Dynamic characteristic of inverter circuits using single-electron transistor / N. Yoshikawa, H. Ishibashi, M. Sugahara // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2005. – № 34. – P. 1332-1338.
15. Бабіч Н. П., Жуков І. А. Комп'ютерна схемотехніка. Методи побудови та проектування / Н. П. Бабич, І. А. Жуків. – К.: «МК-Прес», 2004. – 576 с.
16. Кичак В. М. Математична модель комірки пам'яті на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників / В. М. Кичак, Н. Г. Курилова, І. В. Слободян. // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», Хмельницький. – 2009. – № 1 (33). – С. 113-116.
17. Кичак В. М. Запам'ятовуючий пристрій на базі аморфних напівпровідників / В. М. Кичак, Н. Г. Курилова, І. В. Слободян // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації. Тези доповідей другої Міжнародної науково-практичної конференції, м. Вінниця, 22-24 квітня 2009 року. – Вінниця: УНІВЕРСУМ. – 2009. – С. 172-174. – ISBN 978-966-641-304-1.
18. Hudgens S. Progress in Understanding High-field Threshold Switching in Amorphous Chalcogenide Semiconductors / S. Hudgens // *Workshop on Switching and ON Conduction in Chalcogenide Materials*. – Santa Clara, 2010.
19. Karpov V. G. Nucleation switching in phase-change memory / V. G. Karpov, Y. G. Kryukov, S. D. Savransky, I. V. Karpov // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – Vol. 90. – 123504.

20. Кичак В. М. Аналіз швидкодії елемента пам'яті на базі ХСН / В. М. Кичак, Н. Г. Курилова, І. В. Слободян // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009). Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця, 8-10 жовтня, 2009 р. – Ч. 1. – Вінниця, 2009. – С. 46-48.
21. Кичак В. М. Оцінювання впливу температури на порогову напругу комірки пам'яті на базі аморфних напівпровідників / В. М. Кичак, Н. Г. Курилова, І. В. Слободян // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2011). Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця, 19-21 травня 2011 р., Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 65-67. – ISBN 978-966-641-411-6.
22. Threshold field of phase-change memory materials measured using phase-change bridge devices / D. Krebs, S. Raoux, C. T. Rettner et al. // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 95. – 082101.
23. Kostylev S. A. Threshold and Filament Current Densities in Chalcogenide-Based Switches and Phase-Change-Memory Devices / S. A. Kostylev // IEEE Electron Device Letters. – 2009. – Vol. 30, no. 8. – Pp. 814-816.
24. Salinga M. The gradual nature of threshold switching / M. Salinga, M. Wimmer // EPCOS 2012. Proceedings. – Tampere, 2012. – Pp. 115-120.
25. Akola J. Experimentally constrained density-functional calculations of the amorphous structure of the prototypical phase-change material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ / J. Akola // Physical review B. – 2009. – № 8. – P. 92.
26. Nakazato K. Enhancement of coulomb blockade in semiconductor tunnel junction / K. Nakazato, H. Ahmed // Appl. Phys. Lett. – 1995. – № 66. – P. 3170-3172.
27. Kang D. H. Time-resolved analysis of the set process in an electrical phase-change memory device / D.-H. Kang, B.-k. Cheong, J.-h. Jeong et al. // Appl. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 87. – 253504.
28. Nanosecond switching in GeTe phase change memory cells / G. Bruns, P. Merkelbach, C. Schlockermann et al. // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 95. – P. 91-108.

29. Choi Y. A 20nm 1.8V 8Gb PRAM with 40MB/s Program Bandwidth / Y. Choi, I. Song, M-H. Park et al. // IEEE International Solid-State Circuits Conference. – 2012. – P. 545-552.
30. Burr G. W. Phase change memory technology / G. W. Burr, M. J. Breitwisch, M. Franceschini et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2010. – Vol. 28, no. 2. – P. 223-262.
31. Tsengin K. D. Comparison of new and old generations of the phase change memory chalcogenide materials and devices / K. D. Tsengin, N. A. Bogoslovskiy // Journal of optoelectronics and advanced materials. – 2011. – Vol. 13, no. 11-12. – Pp. 1429-1432.
32. Fons P. Phase transition in crystalline GeTe: Pitfalls of averaging effects / P. Fons, A. V. Kolobov, M. Krbal et al. // Phys. Rev. B. – 2010. – Vol. 82. – P. 155-209.
33. Matsunaga T. The order-disorder transition in GeTe: Views from different length-scales / T. Matsunaga, P. Fons, A. V. Kolobov et al. // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 99. – P. 201-207.
34. Kychak V. Using The Thermal-Field Measurements To Evaluation The Parameters Of The MC Based On AS / Vasyl Kychak, Ivan Slobodian // Modern problems of radio engineering, telecommunication and computer science. Proceeding of the XI-th International Conference TCSET'2012 Dedicated to the 60-th anniversary of the Radio Department at the Lviv Polytechnic National University. – February 21-24, 2012, Lviv – Slavske, Ukraine. Lviv, Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. – P. 153-154. – ISBN 978-617-607-208-9.
35. Andrikopoulos K. S. Raman scattering study of GeTe and Ge₂Sb₂Te₅ phase-change materials / K. S. Andrikopoulos, S. N. Yannopoulos, A. V. Kolobov et al. // J. Phys. Chem. Sol. – 2007. – Vol. 68. – Pp. 1074-1078.
36. Kolobov A. V. Lokal structure of amorphous Ge-Sb-Te alloys: Ge umbrella flip vs. DFT simulations / A.V. Kolobov, P. Fons, J. Tominaga // Phys. Status Solidi B. – 2009. – Vol. 246, no. 8. – Pp. 1826-1830.
37. Krbal M. Crystalline GeTe-based phase-change alloys: Disorder in order / M. Krbal, A.V. Kolobov, P. Fons et al. // Phys. Rev. B. – 2012. – Vol. 86. – P. 205-212.

38. Krbal M. Intrinsic complexity of the melt-quenched amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ memory alloy / M. Krbal, A. V. Kolobov, P. Fons et al. // *Phys. Rev. B.* – 2011. – Vol. 83. – P. 194-203.
39. Fons P. Photoassisted amorphization of the phase-change memory alloy $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ / P. Fons, H. Osawa, A. V. Kolobov et al. // *Phys. Rev. B.* – 2010. – Vol. 82. – 131-144.
40. Kolobov A. V. Distortion-triggered loss of long-range order in solids with bonding energy hierarchy / A. V. Kolobov, M. Krbal, P. Fons et al. // *Nature Chemistry.* – 2011. – Vol. 3. – Pp. 311-136.
41. Akola J. Experimentally constrained density-functional calculations of the amorphous structure of the prototypical phase-change material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ / J. Akola, R. O. Jones, S. Kohara et al. // *Nature Chemistry.* – 2009. – Vol. 80. – P. 214-231.
42. Hegedus J. Microscopic origin of the fast crystallization ability of Ge-Sb-Te phase-change memory materials / J. Hegedus, S. R. Elliot // *Nature Materials.* – 2008. – Vol. 7. – Pp. 399-405.
43. Karpov V. Switching, Electron transport / V. Karpov, D. Georgiev // *Workshop on Switching and ON Conduction in Chalcogenide Materials.* – Santa Clara, 2010. – P. 313-319.
44. Siegrist T. Disorder-induced localization in crystalline phase-change materials / T. Siegrist, P. Jost, H. Volker et al. // *Nature materials.* – 2011. – Vol. 10. – Pp. 202-208.
45. Sousa V. Chalcogenide materials and their application to Non-Volatile Memories / V. Sousa // *Microelectronic Engineering.* – 2011. – Vol. 88. – Pp. 807-813.
46. Boniardi M. A physics-based model of electrical conduction decrease with time in amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ / M. Boniardi, A. Redaelli, A. Pirovano et al. // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 105. – 084506.
47. Ielmini D. Threshold switching mechanism by high-field energy gain in the hopping transport of chalcogenide glasses / D. Ielmini // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 78. – P. 301-308.

48. Бобало Ю. Я. Моделювання та керування процесами формування та контролю якості радіоелектронної апаратури / Ю. Я. Бобало // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 2. – С. 38.
49. Кичак В. М. Дослідження зміни часу перемикання комірки пам'яті на базі ХСН від товщини плівки та перенапруження у зразку / В. М. Кичак, І. В. Слободян // Матеріали Одинадцятої міжнародної науково технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП_11_2012), 5-8 червня 2012 р. Хмельницький національний університет. – 2012. – С. 72-73. – ISBN 978-966-8776-24-3.
50. Conductive path formation in glasses of phase change memory / M. Simon, M. Nardone, V. G. Karpov, I. V. Karpov // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 108. – P. 494-511.
51. Nardone M. A unified model of nucleation switching / M. Nardone, V. G. Karpov, D. C. S. Jackson, I. V. Karpov // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 94. – P. 113-125.
52. Kohary K. Electric field induced crystallization in phase-change materials for memory applications / K. Kohary, C. D. Wright // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 98. – P. 93-102.
53. Owen A. E. Electronic conduction and switching in Chalcogenide Glasses / Owen A. E., Robertson M. // Electron Devices, IEEE Transactions 1973. – Vol. 20.– Issue 2. – P. 91-105.
54. Karpov V. G. Nucleation switching in phase change memory / V. G. Karpov, Y. A. Kryukov, S. D. Savransky // Applied Physics Letters, 2007. – Volume 90, Issue 12. – P. 66.
55. Кичак В. М. Дослідження зміни часу перемикання комірки пам'яті на базі ХСН від товщини плівки та перенапруження у зразку / В. М. Кичак, І. В. Слободян // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», Хмельницький. – 2012. – № 2(40). – С. 67-70.

56. Кичак В. М. Оцінювання залежності часу затримки від температури та концентрації пасток захоплення в комірці пам'яті на базі ХСН / В. М. Кичак, І. В. Слободян // Матеріали Дванадцятої міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (ВОТТП_12_2013) 3-8 червня 2013 р. Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова. – Одеса – Хмельницький: ХНУ, 2013. – С. 69-70. – ISBN 978-966-330-176-1.
57. Temperature Dependence of Phase-Change Random Access Memory Cell / Miao X. C., Shi I. P., Lee H. K., Tan P. K., Lim K. G., Yang H. X., Chong T. C. // Jpn. J. Appl. Phys. Part. 2. – 2006. – V. 45. – P. 39-45.
58. Кичак В. М. Підвищення радіаційної стійкості енергонезалежних запам'ятовувальних пристроїв на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників / В. М. Кичак, І. В. Слободян, В. Л. Вовк // Науковий журнал «Вісник Вінницького політехнічного інституту», Вінниця, 2019, № 4 (145), с. 116-123. – ISSN 1997-9266.
59. Tyler A. Characteristics of OUM Phase Change Materials and Devices for High Density Nonvolatile Commodity and Embedded Memory / Tyler A. Lowrey, Stephen J. Hedges, Wally Czubatuj, Charles H. Dennison, Sergey A. Kostylev and Guy C. Wicker // Applications Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 803. – 2004. – P. 1149-1157.
60. Кичак В. М. Радіаційностійкий запам'ятовуючий пристрій на базі халькогенідного склоподібного напівпровідника / В. М. Кичак, І. В. Слободян, В. Л. Вовк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (80), 2020, с. 79-84. doi: 10.20535/RADAP.2020.80.79-84.
61. Kychak V. INCREASING RADIATION RESISTANCE OF MEMORY DEVICES BASED ON AMORPHOUS SEMICONDUCTORS / Vasyl Kychak, Ivan Slobodian, V. Vovk // Informatyka, Automatyka, Pomiaru W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 10(3), 2020, 78-81.– Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2081>
62. Bogoslovskiy N. A. Multiphonon tunnel ionization of negative-U centers – the origin of switching and memory effects in chalcogenide glasses / N. A. Bogoslovskiy, K. D. Tsendin // Journal of optoelectronics and advanced materials. – 2011. – Vol. 13, no. 11-12. – Pp. 1423-1428.

63. Слободян І. В. Пристрій для читання-запису інформації енергонезалежної комірки пам'яті на базі халькогенідного склоподібного напівпровідника / І. В. Слободян // Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету», Хмельницький, 2015, № 4, с. 153-157. УДК 621.397. – ISSN: 2307-5732.
64. Almasov N. Switching and memory effects in partly crystallized amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films in a current controlled mode / N. Almasov, N. Bogoslovskiy, N. Korobova et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2012. – Vol. 358. – Pp. 3299-3303.
65. Рубіш В. М. Дослідження фазових переходів «аморфна фаза – кристалічна фаза» в плівках системи сурма-селен резистивними і оптичними методами / В. М. Рубіш, В. К. Кириленко, В. М. Мар'ян [та ін.] // Тез. доп. VI Укр. наук. конф. з фізики напівпровідників (УНКФН-6), Чернівці, Україна, 2013. – С. 563-564.
66. Рубіш В. М. Температурні дослідження аморфних плівок з ефектом зміни фази / В. М. Рубіш, В. К. Кириленко, М. О. Дуркот [та ін.] // Тез. докл. IV Междунар. науч. конф. «Наноразмерные системы : строение, свойства, технологии (НАНСИС – 2013)», Киев, Украина, 2013. – С. 408.
67. Кичак В. М. Визначення питомого опору запам'ятовуючого пристрою на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників / В. М. Кичак, Н. Г. Курилова, І. В. Слободян // НАН України, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології», Київ. – 2009. – № 54. – С. 259-263.
68. Philip H. S. Phase Change Memory / H.-S. Philip Wong [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2010. – Vol. 98, № 12. – P. 2201-2227.
69. Rajendran B. Phase change memory technology [Електроннийресурс] / Bipin Rajendran [et al.] / IBM Research Journal. – 2010. Режимдоступудо ресурсу:
http://www.itrs.net/ITWG/Beyond_CMOS/2010Memory_April/Proponent/Nanowire%20PCRAM.pdf.
70. Stephen E. Computer Simulation of the Phase-change Cycle of GST-225 / ElliottStephen // Materials research society. – 2008. – № 53. – P. 42.

71. Мар'ян В. М. Фазові перетворення в халькогенідних стеклах та аморфних плівках / В. М. Мар'ян, О. В. Козусенок, В. К. Кириленко [та ін.] // Тез. доп. V Укр. наук. конф. з фізики напівпровідників (УНКФН-5), Ужгород, 2011. – С. 257.
72. Stefan L. OUM – A 180 nm nonvolatile memory cell element technology for stand-alone and embedded applications / Lai Stefan // Intel Corporation. – 2008. – P. 54.
73. Кичак В. М. Оцінювання параметрів перемикання комірки пам'яті на базі аморфних напівпровідників / В. М. Кичак, І. В. Слободян // Міжнародний науково-технічний журнал «Вісник Вінницького політехнічного інституту», Вінниця, 2013, № 5, с. 114-118, УДК 621.397, ISSN: 1997-9274.
74. Слободян І. В. Пристрій для запису/читання інформації халькогенідного елемента цифрової пам'яті // Матеріали п'ятнадцятої міжнародної конференції «Проблеми інформатики та моделювання «ПІМ-2015». – С. 14.
75. Слободян І. В. Швидкість програмування енергонезалежної пам'яті на базі ХСН / І. В. Слободян // Електронний науково-технічний журнал, визнаний ВАК України, як фахове видання у галузі технічних наук, «Наукові праці Вінницького національного технічного університету», Вінниця, 2014, № 3, УДК 621.397. – ISSN: 1997-9274
76. Слободян І. В. Пристрій для читання/запису інформації енергонезалежної комірки пам'яті на базі халькогенідного склоподібного напівпровідника. Патент на корисну модель № 105200. Патент опубліковано 10.03.2016, бюл. № 5.
77. Kozyukhin S. A. Phase Separation in Chalcogenide Semiconductors of the Ge-Te System Upon Thermal Cycling / S. A. Kozyukhin, A. A. Sherchenkov, A. V. Babich // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. – Elektronika. – 2013. – Vol. 100, no. 2. – P. 3-8.
78. Слободян І. В. Організація та структура матриць пам'яті на базі ХСН / І. В. Слободян // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної

конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2017)», Вінниця, ВНТУ, 2017. – 162 с. – С. 81-83. – УДК 621.38+621.39+681.2. – ISBN 978-966-641-705-6.

79. Руденко Н. М. Дослідження радіаційної деградації і оцінка радіаційної стійкості світлодіодів // Збірник наукових праць ВІТІ ВТУУ «КПІ» № 1 / Н. М. Руденко, І. І. Романова, А. С. Іванов. – 2011. – С. 160-165.
80. Павлик Б. В. Особливості дії низькодозового іонізуючого випромінювання на стабільність кремнієвих діодних сенсорів температури // Sensor Electronics and Microsystem Technologies // Львівський національний університет імені Івана Франка / Б. В. Павлик, І. В. Гарапин, В. М. Злупко. – 2007. – С. 20-23.
81. Баранський П. І., Гайдар Г. П. Радіаційна і термічна стійкість тонких шарів, гетеросистем і наноструктур, створюваних на основі елементарних напівпровідників і напівпровідникових сполук // Отоелектроніка та напівпровідникова техніка, вип. 45. – 2010. – С. 69-75.
82. Барабаш Л. І. Сучасні методи підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів // Питання атомної науки та техніки, Фізика радіаційних пошкоджень і радіаційне матеріалознавство, № 2 // Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України / Л. І. Барабаш, І. М. Вишневський, А. А. Гроза, А. Я. Карпенко, П. Г. Литовченко, М. І. Старчик. – 2007. – С. 182-189.
83. Вікулін І. М. Вплив радіації на термочутливість біполярних транзисторів // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова № 2 // Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова / І. М. Вікулін, В. Е. Горбачов, Ш. Д. Курмашев. – 2015. – С. 12-19.

ДОДАТКОК

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ МОДЕЛЮВАННЯ

Наводиться лістинг основної частини програми для моделювання перехідних процесів, що дозволяє обчислювати температуру та опір комірки пам'яті.

```
using System;
using System.Drawing;
using System.Threading;
using System.Windows.Forms;

namespace MemoryCell
{
    public enum WorkMode
    {
        Amorphization,
        Crystalization,
        Cooling
    }

    public partial class MainForm : Form
    {
        private Bitmap xyBitmap;
        private Bitmap zxBitmap;

        private Computations comp;

        private void DoComputations(object stateInfo)
        {
            Computations data = (Computations)stateInfo;
            int nSteps = (int) ((int) durationUpDown.Value / Computations.TimeStep);

            for (int i = 0; i < nSteps; i++)
            {
                data.Step();
                if (i % 20 == 0)
                {
                    data.UpdateResistance();
                }
                OnCompUpdate(i == nSteps - 1);
            }
        }

        public MainForm()
        {
            InitializeComponent();

            comp = new Computations(WorkMode.Amorphization);
```

```

xyBitmap = new Bitmap(Computations.HalfWidth * 2, Computations.HalfHeight * 2);
xyPictureBox.Image = xyBitmap;
zxBitmap = new Bitmap(Computations.Depth, Computations.HalfWidth * 2);
zxPictureBox.Image = zxBitmap;
yLevelUpDown.Maximum = Computations.HalfHeight * 2;
zLevelUpDown.Maximum = Computations.Depth;

modeComboBox.SelectedIndex = 0;
UpdateBitmaps();
}

private void OnCompUpdate(bool isFinished)
{
    if (!IsDisposed)
    {
        Invoke((Action<bool>) OnCompUpdateSync, isFinished);
    }
}

private void OnCompUpdateSync(bool isFinished)
{
    timeLabel.Text = comp.Time + " nc";
    double x = comp.Time / 10.0;
    if ((Math.Abs(x - Math.Round(x)) < 0.001) || isFinished)
    {
        logTextBox.Text += String.Format("{0,4:F0}: R = {1,4:F5}", comp.Time,
comp.Resistance) + "\r\n";
        logTextBox.Select(logTextBox.TextLength, 0);
    }
    UpdateBitmaps();

    if (isFinished)
    {
        foreach (Control c in Controls)
        {
            c.Enabled = true;
        }
    }
}

private void UpdateBitmaps()
{
    lock(comp.Lock)
    {
        int zLevel = (int)zLevelUpDown.Value, yLevel = (int)yLevelUpDown.Value;

        // Aliases
        int hw = Computations.HalfWidth, hh = Computations.HalfHeight, d =
Computations.Depth;

        for (int x = 0; x < Computations.HalfWidth; x++)

```

```

    {
    for (int y = 0; y < Computations.HalfHeight; y++)
    {
        int coef = (int)Math.Floor(256 - 256 * comp.Temperature[x, y, zLevel] / 700.0);
        Color c = Color.FromArgb(coef, 255, 255);

        xyBitmap.SetPixel(hw - x, hh - y, c);
        xyBitmap.SetPixel(hw - x, hh + y, c);

        if ((x == yLevel) && yLevelCheckBox.Checked)
        {
            c = Color.FromArgb(224, 0, 0);
        }

        xyBitmap.SetPixel(hw + x, hh - y, c);
        xyBitmap.SetPixel(hw + x, hh + y, c);
    }
}

for (int x = 0; x < hw; x++)
{
    for (int z = 0; z < d; z++)
    {
        int coef = (int)Math.Floor(256 - 256 * comp.Temperature[x, yLevel, z] / 700.0);

        Color c = ((z == zLevel) && zLevelCheckBox.Checked) ?
            Color.FromArgb(224, 0, 0) : Color.FromArgb(coef, 255, 255);

        zxBitmap.SetPixel(z, hw - x, c);
        zxBitmap.SetPixel(z, hw + x, c);
    }
}

xyPictureBox.Invalidate();
zxPictureBox.Invalidate();
}
}

private void zLevelUpDown_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
{
    UpdateBitmaps();
}

private void yLevelUpDown_ValueChanged(object sender, EventArgs e)
{
    UpdateBitmaps();
}

private void startButton_Click(object sender, EventArgs e)
{
    foreach (Control c in Controls)

```



```

    {
        if ((string) c.Tag != "1")
        {
            c.Enabled = false;
        }
    }
    ThreadPool.QueueUserWorkItem(new WaitCallback(DoComputations), comp);
}

private void modeComboBox_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{
    switch (modeComboBox.SelectedIndex)
    {
        case 0: comp.mode = WorkMode.Amorphization; break;
        case 1: comp.mode = WorkMode.Crystalization; break;
        case 2: comp.mode = WorkMode.Cooling; break;
    }
}

private void zLevelCheckBox_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    UpdateBitmaps();
}

private void yLevelCheckBox_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    UpdateBitmaps();
}

private void restartButton_Click(object sender, EventArgs e)
{
    comp.Restart();
    modeComboBox.SelectedIndex = 0;
    timeLabel.Text = "0 нс";
    logTextBox.Text = "";
    UpdateBitmaps();
}
}

class Computations
{
    public readonly double[, ] Temperature;
    public readonly double[, ] Current;
    public double Time;
    public double Resistance;

    public readonly object Lock = new object();

    public WorkMode mode;

    public const int HalfWidth = 240;
}

```

```

public const int HalfHeight = 240;
public const int Depth = 80;
public const int HalfZoneWidth = 60;
public const int HalfZoneHeight = 60;

public const double HighResistance = 200.0;
public const double LowResistance = 1.0;
public const double MaxTemperature = 700.0;
public const double InitialTemperature = 20.0;
public const double LowRTC = 0.14;
public const double HighRTC = 0.06;
public const double TimeStep = 0.25;

public Computations(WorkMode mode)
{
    this.Temperature = new double[HalfWidth, HalfHeight, Depth];
    this.Current = new double[HalfWidth, HalfHeight, Depth];
    this.mode = mode;
    Restart();
}

public void Restart()
{
    Time = 0.0;

    for (int x = 0; x < HalfWidth; x++)
    {
        for (int y = 0; y < HalfHeight; y++)
        {
            for (int z = 0; z < Depth; z++)
            {
                Temperature[x, y, z] = InitialTemperature;
                Current[x, y, z] = LowResistance;
            }
        }
    }
}

public void Step()
{
    lock (Lock)
    {
        double zoneTemp = 20.0;
        switch (mode)
        {
            case WorkMode.Amorphization: zoneTemp = 700.0; break;
            case WorkMode.Crystalization: zoneTemp = 400.0; break;
            case WorkMode.Cooling: zoneTemp = 27.0; break;
        }

        double[, ,] newTemp = (double[, ,])Temperature.Clone();
    }
}

```

```

for (int x = 0; x < HalfWidth; x++)
{
    for (int y = 0; y < HalfHeight; y++)
    {
        for (int z = 0; z < Depth; z++)
        {
            double delta = 0;
            double coef = (Current[x, y, z] == LowResistance) ? LowRTC : HighRTC;
            if (x > 0) delta -= coef * (Temperature[x, y, z] - Temperature[x - 1, y, z]);
            if (x < HalfWidth - 1) delta -= coef * (Temperature[x, y, z] - Temperature[x
+ 1, y, z]);
            if (y > 0) delta -= coef * (Temperature[x, y, z] - Temperature[x, y - 1, z]);
            if (y < HalfHeight - 1) delta -= coef * (Temperature[x, y, z] - Temperature[x,
y + 1, z]);
            if (z > 0) delta -= coef * (Temperature[x, y, z] - Temperature[x, y, z - 1]);
            if (z < Depth - 1) delta -= coef * (Temperature[x, y, z] - Temperature[x, y, z
+ 1]);

            newTemp[x, y, z] = Temperature[x, y, z] + delta;
            if ((newTemp[x, y, z] >= 600.0) && (mode == WorkMode.Amorphization))
            {
                Current[x, y, z] = HighResistance;
            }
            if ((newTemp[x, y, z] >= 300.0) && (mode == WorkMode.Crystallization))
            {
                Current[x, y, z] = LowResistance;
            }
        }
    }
}

for (int x = 0; x < HalfZoneWidth; x++)
{
    for (int y = 0; y < HalfZoneHeight; y++)
    {
        double coef = (Current[x, y, 0] == LowResistance) ? LowRTC : HighRTC;
        newTemp[x, y, 0] = Temperature[x, y, 0] + coef * (zoneTemp - Temperature[x,
y, 0]);
    }
}

Array.Copy(newTemp, Temperature, Temperature.Length);

Time += TimeStep;
}
}

public void UpdateResistance()
{
    double l = 0.0, res, totalRes;
    double sqZ = (Depth + 1) * (Depth + 1);

```

```

double kx = (HalfWidth - HalfZoneWidth) / Depth;
double ky = (HalfHeight - HalfZoneHeight) / Depth;

totalRes = 0.0;
int dx, dy;

for (int x = 0; x < HalfZoneWidth; x++)
{
    for (int y = 0; y < HalfZoneHeight; y++)
    {
        l = Math.Floor(Math.Sqrt(sqZ + kx * kx * x * x + ky * ky * y * y));
        res = 0.0;
        for (int z = 0; z < Depth; z++)
        {
            dx = (int)Math.Ceiling(kx * z) + x;
            dy = (int)Math.Ceiling(ky * z) + y;
            res += 1 / Depth * Current[dx, dy, z];
        }
        totalRes += 1 / res;
    }
}

totalRes = 1 / totalRes;
Resistance = totalRes;
}
}
}

namespace MemoryCell
{
    partial class MainForm
    {
        /// <summary>
        /// Required designer variable.
        /// </summary>
        private System.ComponentModel.IContainer components = null;

        /// <summary>
        /// Clean up any resources being used.
        /// </summary>
        /// <param name="disposing">true if managed resources should be disposed; otherwise,
false.</param>
        protected override void Dispose(bool disposing)
        {
            if (disposing && (components != null))
            {
                components.Dispose();
            }
            base.Dispose(disposing);
        }
    }
}

```

#region Windows Form Designer generated code

```
/// <summary>
/// Required method for Designer support - do not modify
/// the contents of this method with the code editor.
/// </summary>
private void InitializeComponent()
{
    this.xyPictureBox = new System.Windows.Forms.PictureBox();
    this.zxPictureBox = new System.Windows.Forms.PictureBox();
    this.startButton = new System.Windows.Forms.Button();
    this.viewGroupBox = new System.Windows.Forms.GroupBox();
    this.yLevelCheckBox = new System.Windows.Forms.CheckBox();
    this.zLevelCheckBox = new System.Windows.Forms.CheckBox();
    this.yLevelLabel = new System.Windows.Forms.Label();
    this.zLevelLabel = new System.Windows.Forms.Label();
    this.yLevelUpDown = new System.Windows.Forms.NumericUpDown();
    this.zLevelUpDown = new System.Windows.Forms.NumericUpDown();
    this.emulationGroupBox = new System.Windows.Forms.GroupBox();
    this.restartButton = new System.Windows.Forms.Button();
    this.modeComboBox = new System.Windows.Forms.ComboBox();
    this.durationUpDown = new System.Windows.Forms.NumericUpDown();
    this.label2 = new System.Windows.Forms.Label();
    this.durationLabel = new System.Windows.Forms.Label();
    this.logTextBox = new System.Windows.Forms.TextBox();
    this.timeLabel = new System.Windows.Forms.Label();
    ((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.xyPictureBox)).BeginInit();
    ((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.zxPictureBox)).BeginInit();
    this.viewGroupBox.SuspendLayout();
    ((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.yLevelUpDown)).BeginInit();
    ((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.zLevelUpDown)).BeginInit();
    this.emulationGroupBox.SuspendLayout();
    ((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.durationUpDown)).BeginInit();
    this.SuspendLayout();
    //
    // xyPictureBox
    //
    this.xyPictureBox.Location = new System.Drawing.Point(12, 12);
    this.xyPictureBox.Name = "xyPictureBox";
    this.xyPictureBox.Size = new System.Drawing.Size(480, 480);
    this.xyPictureBox.SizeMode = System.Windows.Forms.PictureBoxSizeMode.Zoom;
    this.xyPictureBox.TabIndex = 0;
    this.xyPictureBox.TabStop = false;
    //
    // zxPictureBox
    //
    this.zxPictureBox.Location = new System.Drawing.Point(517, 12);
    this.zxPictureBox.Name = "zxPictureBox";
    this.zxPictureBox.Size = new System.Drawing.Size(80, 480);
    this.zxPictureBox.SizeMode = System.Windows.Forms.PictureBoxSizeMode.Zoom;
    this.zxPictureBox.TabIndex = 1;
```

```

this.zxPictureBox.TabStop = false;
//
// startButton
//
this.startButton.Location = new System.Drawing.Point(602, 43);
this.startButton.Name = "startButton";
this.startButton.Size = new System.Drawing.Size(182, 52);
this.startButton.TabIndex = 6;
this.startButton.Text = "Почати";
this.startButton.UseVisualStyleBackColor = true;
this.startButton.Click += new System.EventHandler(this.startButton_Click);
//
// viewGroupBox
//
this.viewGroupBox.Controls.Add(this.yLevelCheckBox);
this.viewGroupBox.Controls.Add(this.zLevelCheckBox);
this.viewGroupBox.Controls.Add(this.yLevelLabel);
this.viewGroupBox.Controls.Add(this.zLevelLabel);
this.viewGroupBox.Controls.Add(this.yLevelUpDown);
this.viewGroupBox.Controls.Add(this.zLevelUpDown);
this.viewGroupBox.Location = new System.Drawing.Point(12, 530);
this.viewGroupBox.Name = "viewGroupBox";
this.viewGroupBox.Size = new System.Drawing.Size(1053, 200);
this.viewGroupBox.TabIndex = 7;
this.viewGroupBox.TabStop = false;
this.viewGroupBox.Text = "Зображення";
//
// yLevelCheckBox
//
this.yLevelCheckBox.AutoSize = true;
this.yLevelCheckBox.Checked = true;
this.yLevelCheckBox.CheckState = System.Windows.Forms.CheckState.Checked;
this.yLevelCheckBox.Location = new System.Drawing.Point(562, 119);
this.yLevelCheckBox.Name = "yLevelCheckBox";
this.yLevelCheckBox.Size = new System.Drawing.Size(270, 36);
this.yLevelCheckBox.TabIndex = 11;
this.yLevelCheckBox.Text = "Показати рівень";
this.yLevelCheckBox.UseVisualStyleBackColor = true;
this.yLevelCheckBox.CheckedChanged += new
System.EventHandler(this.yLevelCheckBox_CheckedChanged);
//
// zLevelCheckBox
//
this.zLevelCheckBox.AutoSize = true;
this.zLevelCheckBox.Checked = true;
this.zLevelCheckBox.CheckState = System.Windows.Forms.CheckState.Checked;
this.zLevelCheckBox.Location = new System.Drawing.Point(562, 61);
this.zLevelCheckBox.Name = "zLevelCheckBox";
this.zLevelCheckBox.Size = new System.Drawing.Size(270, 36);
this.zLevelCheckBox.TabIndex = 10;
this.zLevelCheckBox.Text = "Показати рівень";

```

```

        this.zLevelCheckBox.UseVisualStyleBackColor = true;
        this.zLevelCheckBox.CheckedChanged += new
System.EventHandler(this.zLevelCheckBox_CheckedChanged);
        //
        // yLevelLabel
        //
        this.yLevelLabel.AutoSize = true;
        this.yLevelLabel.Location = new System.Drawing.Point(25, 121);
        this.yLevelLabel.Name = "yLevelLabel";
        this.yLevelLabel.Size = new System.Drawing.Size(312, 32);
        this.yLevelLabel.TabIndex = 9;
        this.yLevelLabel.Text = "Вертикальний переріз";
        //
        // zLevelLabel
        //
        this.zLevelLabel.AutoSize = true;
        this.zLevelLabel.Location = new System.Drawing.Point(25, 63);
        this.zLevelLabel.Name = "zLevelLabel";
        this.zLevelLabel.Size = new System.Drawing.Size(341, 32);
        this.zLevelLabel.TabIndex = 8;
        this.zLevelLabel.Text = "Горизонтальний переріз";
        //
        // yLevelUpDown
        //
        this.yLevelUpDown.Location = new System.Drawing.Point(405, 119);
        this.yLevelUpDown.Name = "yLevelUpDown";
        this.yLevelUpDown.Size = new System.Drawing.Size(120, 38);
        this.yLevelUpDown.TabIndex = 7;
        this.yLevelUpDown.ValueChanged += new
System.EventHandler(this.yLevelUpDown_ValueChanged);
        //
        // zLevelUpDown
        //
        this.zLevelUpDown.Location = new System.Drawing.Point(405, 57);
        this.zLevelUpDown.Name = "zLevelUpDown";
        this.zLevelUpDown.Size = new System.Drawing.Size(120, 38);
        this.zLevelUpDown.TabIndex = 6;
        this.zLevelUpDown.ValueChanged += new
System.EventHandler(this.zLevelUpDown_ValueChanged);
        //
        // emulationGroupBox
        //
        this.emulationGroupBox.Controls.Add(this.restartButton);
        this.emulationGroupBox.Controls.Add(this.modeComboBox);
        this.emulationGroupBox.Controls.Add(this.durationUpDown);
        this.emulationGroupBox.Controls.Add(this.startButton);
        this.emulationGroupBox.Controls.Add(this.label2);
        this.emulationGroupBox.Controls.Add(this.durationLabel);
        this.emulationGroupBox.Location = new System.Drawing.Point(12, 745);
        this.emulationGroupBox.Name = "emulationGroupBox";
        this.emulationGroupBox.Size = new System.Drawing.Size(1053, 170);

```

```

this.emulationGroupBox.TabIndex = 8;
this.emulationGroupBox.TabStop = false;
this.emulationGroupBox.Text = "Емуляція";
//
// restartButton
//
this.restartButton.Location = new System.Drawing.Point(804, 43);
this.restartButton.Name = "restartButton";
this.restartButton.Size = new System.Drawing.Size(182, 52);
this.restartButton.TabIndex = 12;
this.restartButton.Text = "Перезапуск";
this.restartButton.UseVisualStyleBackColor = true;
this.restartButton.Click += new System.EventHandler(this.restartButton_Click);
//
// modeComboBox
//
this.modeComboBox.DropDownStyle =
System.Windows.Forms.ComboBoxStyle.DropDownList;
this.modeComboBox.FormattingEnabled = true;
this.modeComboBox.Items.AddRange(new object[] {
"Аморфізація",
"Кристалізація",
"Остигання"});
this.modeComboBox.Location = new System.Drawing.Point(271, 107);
this.modeComboBox.Name = "modeComboBox";
this.modeComboBox.Size = new System.Drawing.Size(254, 39);
this.modeComboBox.TabIndex = 11;
this.modeComboBox.SelectedIndexChanged += new
System.EventHandler(this.modeComboBox_SelectedIndexChanged);
//
// durationUpDown
//
this.durationUpDown.Increment = new decimal(new int[] {
10,
0,
0,
0});
this.durationUpDown.Location = new System.Drawing.Point(405, 52);
this.durationUpDown.Maximum = new decimal(new int[] {
500,
0,
0,
0});
this.durationUpDown.Name = "durationUpDown";
this.durationUpDown.Size = new System.Drawing.Size(120, 38);
this.durationUpDown.TabIndex = 10;
this.durationUpDown.Value = new decimal(new int[] {
100,
0,
0,
0});

```



```

//
// label2
//
this.label2.AutoSize = true;
this.label2.Location = new System.Drawing.Point(42, 110);
this.label2.Name = "label2";
this.label2.Size = new System.Drawing.Size(163, 32);
this.label2.TabIndex = 1;
this.label2.Text = "Тип впливу";
//
// durationLabel
//
this.durationLabel.AutoSize = true;
this.durationLabel.Location = new System.Drawing.Point(42, 54);
this.durationLabel.Name = "durationLabel";
this.durationLabel.Size = new System.Drawing.Size(226, 32);
this.durationLabel.TabIndex = 0;
this.durationLabel.Text = "Час емуляції, пс";
//
// logTextBox
//
this.logTextBox.Font = new System.Drawing.Font("Courier New", 8.1F,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point, ((byte)(204)));
this.logTextBox.Location = new System.Drawing.Point(625, 12);
this.logTextBox.Multiline = true;
this.logTextBox.Name = "logTextBox";
this.logTextBox.ReadOnly = true;
this.logTextBox.ScrollBars = System.Windows.Forms.ScrollBars.Vertical;
this.logTextBox.Size = new System.Drawing.Size(440, 480);
this.logTextBox.TabIndex = 9;
this.logTextBox.Tag = "1";
//
// timeLabel
//
this.timeLabel.AutoSize = true;
this.timeLabel.Location = new System.Drawing.Point(12, 13);
this.timeLabel.Name = "timeLabel";
this.timeLabel.Size = new System.Drawing.Size(68, 32);
this.timeLabel.TabIndex = 10;
this.timeLabel.Tag = "1";
this.timeLabel.Text = "0 пс";
//
// MainForm
//
this.AutoScaleDimensions = new System.Drawing.SizeF(240F, 240F);
this.AutoScaleMode = System.Windows.Forms.AutoScaleMode.Dpi;
this.AutoSize = true;
this.ClientSize = new System.Drawing.Size(1077, 940);
this.Controls.Add(this.timeLabel);
this.Controls.Add(this.logTextBox);
this.Controls.Add(this.emulationGroupBox);

```

```

this.Controls.Add(this.viewGroupBox);
this.Controls.Add(this.zxPictureBox);
this.Controls.Add(this.xyPictureBox);
this.FormBorderStyle = System.Windows.Forms.FormBorderStyle.FixedSingle;
this.MaximizeBox = false;
this.Name = "MainForm";
this.StartPosition = System.Windows.Forms.FormStartPosition.CenterScreen;
this.Text = "Емуляція комірки пам'яті";
((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.xyPictureBox)).EndInit();
((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.zxPictureBox)).EndInit();
this.viewGroupBox.ResumeLayout(false);
this.viewGroupBox.PerformLayout();
((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.yLevelUpDown)).EndInit();
((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.zLevelUpDown)).EndInit();
this.emulationGroupBox.ResumeLayout(false);
this.emulationGroupBox.PerformLayout();
((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.durationUpDown)).EndInit();
this.ResumeLayout(false);
this.PerformLayout();

```

```

}

```

```

#endregion

```

```

private System.Windows.Forms.PictureBox xyPictureBox;
private System.Windows.Forms.PictureBox zxPictureBox;
private System.Windows.Forms.Button startButton;
private System.Windows.Forms.GroupBox viewGroupBox;
private System.Windows.Forms.Label yLevelLabel;
private System.Windows.Forms.Label zLevelLabel;
private System.Windows.Forms.NumericUpDown yLevelUpDown;
private System.Windows.Forms.NumericUpDown zLevelUpDown;
private System.Windows.Forms.GroupBox emulationGroupBox;
private System.Windows.Forms.ComboBox modeComboBox;
private System.Windows.Forms.NumericUpDown durationUpDown;
private System.Windows.Forms.Label label2;
private System.Windows.Forms.Label durationLabel;
private System.Windows.Forms.TextBox logTextBox;
private System.Windows.Forms.Label timeLabel;
private System.Windows.Forms.CheckBox yLevelCheckBox;
private System.Windows.Forms.CheckBox zLevelCheckBox;
private System.Windows.Forms.Button restartButton;
}
}

```

Наукове видання

**Кичак Василь Мартинович
Слободян Іван Володимирович**

**РАДІАЦІЙНО-СТІЙКІ ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧІ ЕЛЕМЕНТИ
НА БАЗІ АМОРФНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ**

Монографія

Рукопис підготовлено *В. Кичаком*

Оригінал-макет виготовлено у РВВ ВНТУ

Підписано до друку 28.03.2025 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 9,84.
Наклад 16 прим. Зам. 2025-005.

Видавець та виготовлювач –
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
press.vntu.edu.ua
E-mail: rvv.vntu@gmail.com
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.