

**І. В. Слободян**

## **ШВИДКІСТЬ ПРОГРАМУВАННЯ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНОЇ ПАМ'ЯТІ НА БАЗІ ХСН**

*Проведено дослідження впливу низки чинників на швидкість програмування енергоне залежної пам'яті (ЕНП) на базі халькогенідного склоподібного напівпровідника (ХСН). Описано метод визначення швидкості програмування для увімкнення пристрою (кристалізація, низькоомний стан) і вимкнення (аморфізація, високоомний стан). Також показано, що швидкість увімкнення (вимкнення) ЕНП переважно залежить від електричного контакту пристрою.*

**Ключові слова:** зміна фази, швидкість увімкнення-вимкнення, кристалізація-аморфізація.

### **Вступ**

Енергоне залежна пам'ять на базі ХСН (ЕНП) змінює фазовий стан із високоомного на низькоомний і навпаки під дією електричного сигналу. Уважають, що така ЕНП може в перспективі замінити наявні види енергоне залежної пам'яті, навіть ті, які мають високу швидкість обміну інформацією та стабільність роботи, і перевищити їхні характеристики. Халькогенідний склоподібний напівпровідник (ХСН), який використовують у цій ЕНП немає фундаментальних обмежень швидкості перезапису (до суб-наносекунд) і в розмірах комірок пам'яті (КП) (до 50 ангстрем). До переваг належить і те, що досягнутий рівень струму перезапису не пошкоджує пам'ять і не зменшує циклів перезапису, як це було в перших зразках пам'яті.

Технологія фазових змін у ХСН (GeSbTe), яку винайшов і розвив Стен Овшинські, швидко набула комерціалізації в галузі енергоне залежної пам'яті [1]. Зусилля багатьох наукових груп прискорили цей процес [2]. Провідність, а не рефлексивність є головною характеристикою зміни фази сплаву цього напівпровідника, що врешті і стало головною причиною обрання ХСН базовим матеріалом для нового покоління ЕНП. Різні композитні сплави ХСН, які використовують для ЕНП мають набагато ширший спектр, ніж для оптичних приладів персонального комп'ютера (ПК) [3].

Технологія ЕНП для ПК заснована на фазових перетвореннях у середовищі напівпровідника з об'ємною від'ємною диференціальною провідністю S-типу (S-ВДО), яка існує завдяки високій щільності ниток струму, і саме це призводить до зміни фазового стану напівпровідника [4]. Існує загальноприйнятий погляд, що нитка струму в пристрої ЕНП добре сформована і її динамічний опір близький до нуля. Отже, будь-яке відхилення від 0, виміряне на приладі ( $dU/dI$  за діапазону струму перезапису), зумовлене загальною сумою всіх резисторів у серії між зондами, серед яких і опір контактів.

В оптичній пам'яті енергія програмування (запису, стирання, перезапису) прикладається безпосередньо до поверхні пристрою зберігання інформації за допомогою лазерного променя. А у приладах електричної пам'яті енергія передається за допомогою електричного сигналу, що проходить через металеві або напівметалеві контакти [2, 4]. Матеріал із S-ВДО підвищує роль неоднорідностей і має можливість зберігати стабільні стани низького та високого опору без прикладання зовнішньої енергії [4].

Знаючи матеріал контактів і геометрію приладу, ВАХ перемикачів ЕНП часто збігається з практично отриманими значеннями опору контактів і не залежить від товщини й температури халькогеніду. Деякі зміни значень ВАХ, що можуть траплятися, спричинені змінами вхідного і вихідного опорів інтерфейсу приладу.

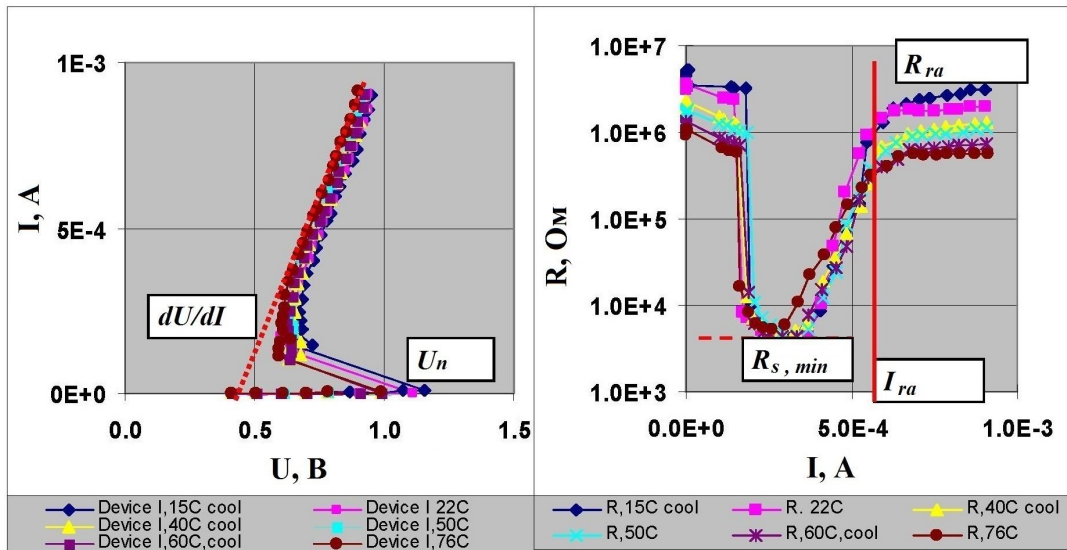


Рис. 1. ВАХ типової ЕНП на базі ХСН типу BDL зразка сплаву №225 ( $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ) з вуглецевими (карбоневими) контактами

На рис. 1 показано типові залежності опору від струму ( $R/I$ ) та струму від напруги ( $I/U$ , ВАХ) для ЕНП за різних значень температури. Такі прилади мають тип «пробую», що описано в праці [2]. Усі інші дані взяті з опублікованих результатів практичного моделювання з ознайомчою метою для отримання конкретних виразів. Поточне значення насиченого ( $I_{ra}$ , червона лінія) опору вимкнення ( $Rr$ ) і значення опору в кривій мінімумів залежності  $R/I$  (пунктирна лінія) показує опір увімкнення ( $R_s$ ), який отримано на підставі електричного низькопольового вимірювання суми всіх резисторів між зондами –  $R_s$  і опорів контактів –  $dU/dI$ . Отже, мінімальний опір халькогенідного матеріалу у КП:

$$R_{XCH \min} = R_{s \min} - dU/dI, \quad (1)$$

де  $dU/dI$  вимірюють за нахилом кривої залежності  $I/U$  від 50% до 100% струму вимкнення (стирання) у зв'язку з можливою нелінійністю процесу.

**Метою** цієї статті є дослідження впливу рівня струму перезапису, зміни фази композитного сплаву зразка і його товщини, матеріалів контакту електродів, геометрії приладу і температури на швидкість програмування ЕНП.

### Експериментальна частина

ЕНП працюють на основі теорії «пробую» з утворенням структури каналців струму, що призводить до зміни провідності. Уся інформація про сучасні пристрої з використанням халькогенідів у якості запам'ятовувального шару, що виготовляють електронно-променевою літографією (ЕПЛ) з утворенням шару електричного пробую (BDL – break-down layer), має експериментальне походження [3].

**Метод вимірювання швидкості вимкнення.** Швидкість стирання пам'яті зазвичай вимірюють застосуванням оптимізованих електричних імпульсів увімкнення та зміни тривалості оптимізованих імпульсів вимкнення, як це показано на рис. 2.

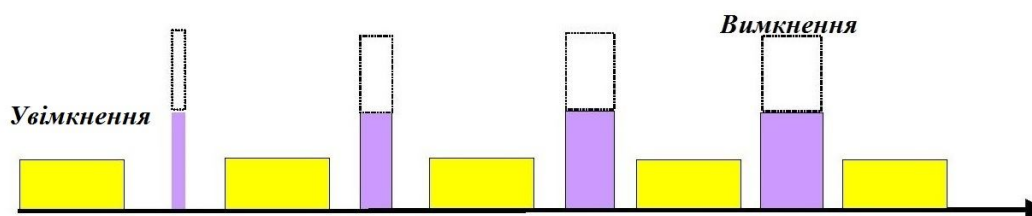


Рис. 2. Схема тесту швидкості стирання; фіксовані імпульси ввімкнення (тривалість і амплітуда) та вимкнення (амплітуда)

Оптимізовані амплітуди розраховують на основі даних, отриманих із вимірної ВАХ реального пристрою. Причому інформацію збирають з її амплітудних значень як параметрів шляхом зміни тривалості імпульсу стирання від 10 нс до 500 нс.

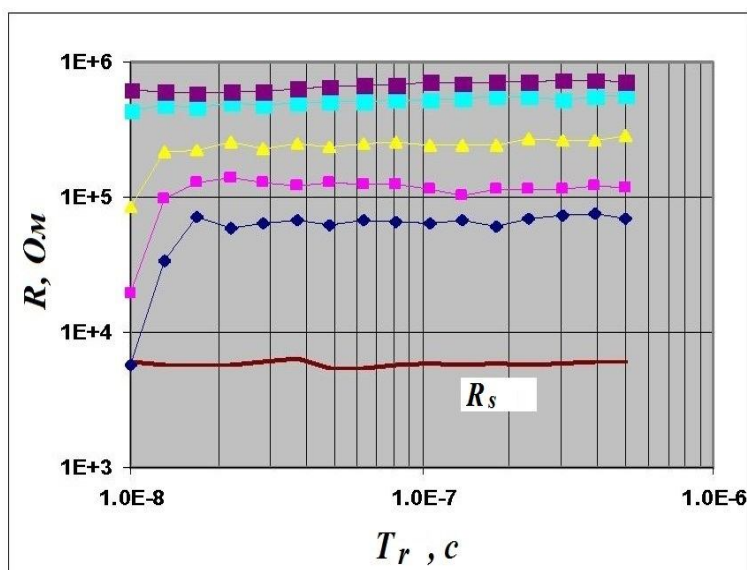


Рис. 3. Приклад графіка  $R_r.t/Tr$  з різними амплітудами вимкнення

Опір низькопольових пристроїв вимірюють на постійному струмі, що подається з незначною його зміною після кожного імпульсу. Остаточно швидкість стирання визначають як співвідношення  $I_r$  до  $I_{r_a}$ , коли  $T_r$  падає нижче 20 нс. В цьому випадку струм насичення досягає свого номінального значення, а початковий опір вимкнення обирається в межах 1 кОм...1000 кОм.

**Метод вимірювання швидкості ввімкнення.** На рис. 4 показано результати тестування комірки пам'яті. З моменту, коли прилад починає вмикатися, необхідне значення опору ввімкнення ( $R_{s0}$ ) досягається майже одразу. Наступне значення амплітуди вимкнення збільшується (тривалість імпульсу вимкнення залишається фіксованою протягом всього тесту), далі на пристрій, щоб його ввімкнути, подають усе більш широкі імпульси ввімкнення, і це призводить до все більш швидкої зміни фази пристрою.

Необхідне значення опору ввімкнення визначають так:

$$R_{s_0} = 10^{\{\log(R_s) + [\log(R_r/R_s)]/6\}} \quad (2)$$

Результати обчислень наведено на рис. 5.

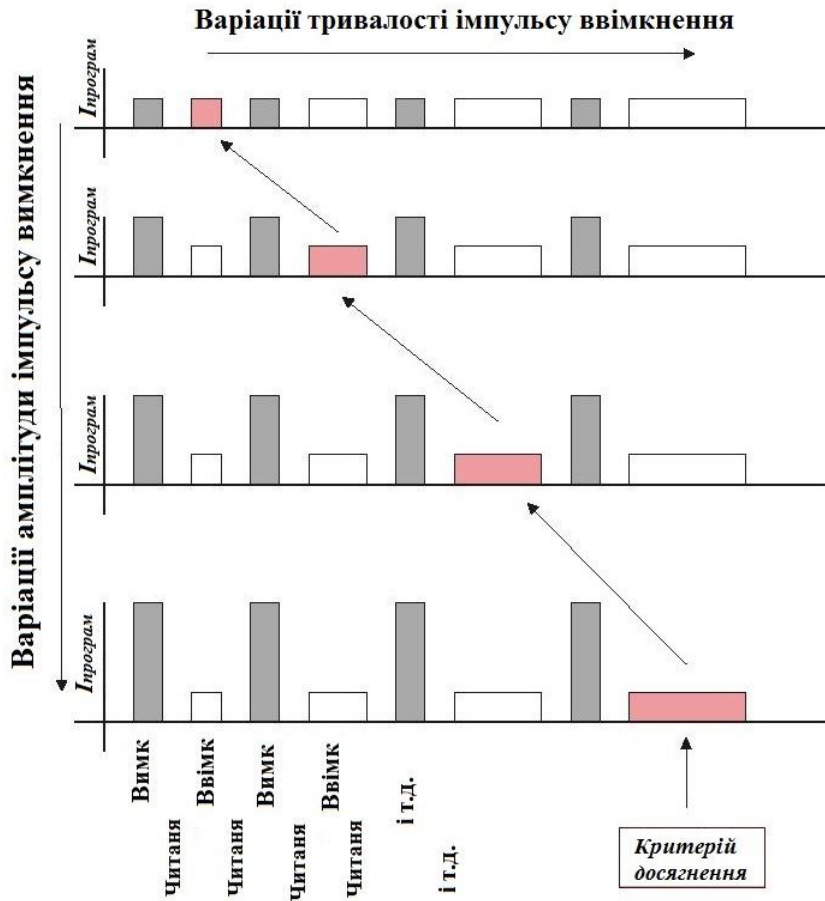


Рис. 4. Схема тесту визначення швидкості ввімкнення

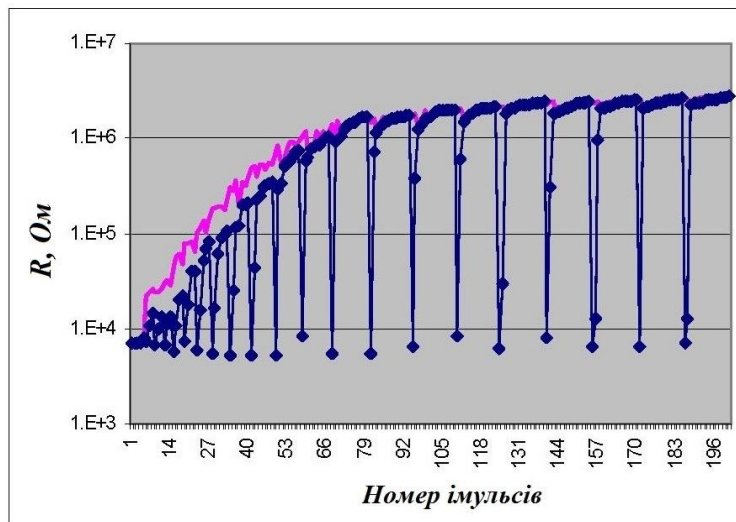


Рис. 5. Приклад вихідних даних

### Результати і обговорення

Вище були приведені результати експериментального вивчення кінетики зміни фаз ХСН з аморфного до кристалічного станів для півки зразка складу GST №225 з товщиною від 13 до 100 нм. Спочатку необхідно показати, що опір вимкнення у пристрої типу каналців струму може бути розрахований з геометричної фігури, зображеної у формі

перевернутого конуса зі зрізаною вершиною. У такому випадку опір будуть розраховувати за формулою [2]:

$$R = (\rho \cdot d) / (\pi \cdot r(r + d/\operatorname{tg}\alpha)), \quad (3)$$

де  $r$  – радіус нижнього контакту,  $d$  – товщина плівки ХСН,  $\alpha$  – пов’язано із поширенням нитки струму і береться  $45^\circ$ .

На рис. 6 показано експериментальні дані та масштабування  $Rr_a$  відносно товщини плівки ХСН.

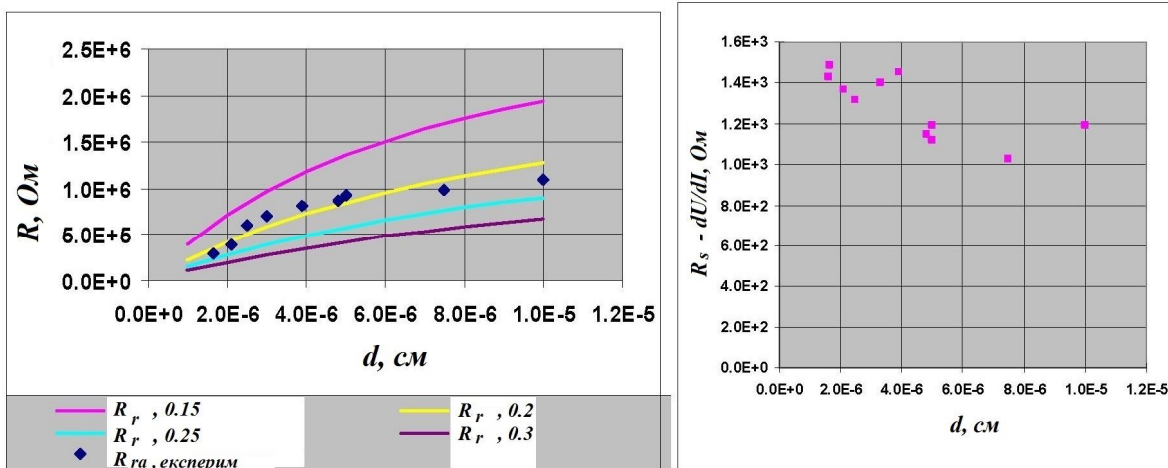


Рис. 6. Обчислені та експериментально отримані значення  $Rr_a$  і графік масштабування  $R_s - dU/dI$  відносно  $d$

Як видно,  $Rr_a$  задовольняє вищенаведений вираз із діаметром струмопровідного каналу  $2r = 2000$  ангстрем. Порівняння порогової напруги перемикавання КП ЕНП із товщиною плівки ХСН [3] також підтвердило, що вся товщина пристрою зосереджена у фазовому переході. З іншого боку, опір увімкнення  $R_s$  після вирахування  $dU/dI$  не порівнюють із товщиною  $d$  плівки ХСН. Це свідчить про наявність шару з високим значенням низькопольового питомого опору, що не залежить від товщини ХСН.

Тепер розглянемо «час кристалізації», який визначають за допомогою тривалості імпульсів увімкнення, потрібних для досягнення пристроєм необхідного рівня опору, за якого починається вимкнення, як показано на рис. 7 [2]. Тривалість імпульсу вимкнення 20 нс. У момент, коли пристрій майже ввімкнувся, необхідна тривалість імпульсів вимкнення зростає практично в геометричній прогресії:

$$T_s = T_{s_{\min}} \exp(G \cdot R_r), \quad (4)$$

де  $G$  – характеристика провідності з деяким проміжним насиченням, що змінюється по вертикалі подібно до  $Rr$ .

Зростання тривалості імпульсу ввімкнення спостерігають, коли залишкова кількість фракцій кристалічних частинок у пристрої зменшується. Уважають, що вертикальне зростання тривалості імпульсу з’являється за опору вимкнення відповідно до втрати скупчень кристалічної структури. Варто додати, що  $T_s$  – це не просто час кристалізації, а час досягнення всієї кристалічної області певного значення і створення більш повного контакту з інтерфейсом електрода для досягнення потрібного опору  $R_{s_a}$  для повноцінного перемикавання стану.

Відомо, що  $T_{s_{min}}$  змінюється пропорційно відносно товщини плівки ХСН [3], і це дозволило нам припустити, що фронт кристалізації поширюється через об'єм ХСН між контактами вздовж шляху струму з приблизною швидкістю 600 см/с. Отже, з одного боку мінімальний опір плівки халькогенідного напівпровідника  $R_{XCH_{min}}$  не пропорційний до товщини, але з іншого боку кристалізація матеріалу поширюється від одного контакту до іншого. Ці два спостереження, узяті разом, дозволяють припустити, що область кристалізації загалом відповідає за  $R_s$ , що локалізована на одному з контактів.

Значення амплітуди імпульсу ввімкнення із збільшенням тривалості  $U_{s_0}$ , графік якої зображений на рис. 7б, необхідно встановити нижче добутку потрібного значення опору  $R_{s_0}$  та струму вимкнення  $I_r$ , крива  $RI$  яких зображена на рис. 7.

$$U_{s_0} < R_{s_0} \cdot I_r \quad (5)$$

Значення насиченого опору вимкнення  $R_{r_a}$  визначають безпосередньо з ВАХ пристрою, а насичені струми вимкнення  $I_{r_a}$  і ввімкнення  $I_{s_a}$  повинні мати значення ще на 20% вищі за критичні, за яких здійснюється перехід матеріалу запам'ятовувального шару ЕНП з однієї фази в іншу.

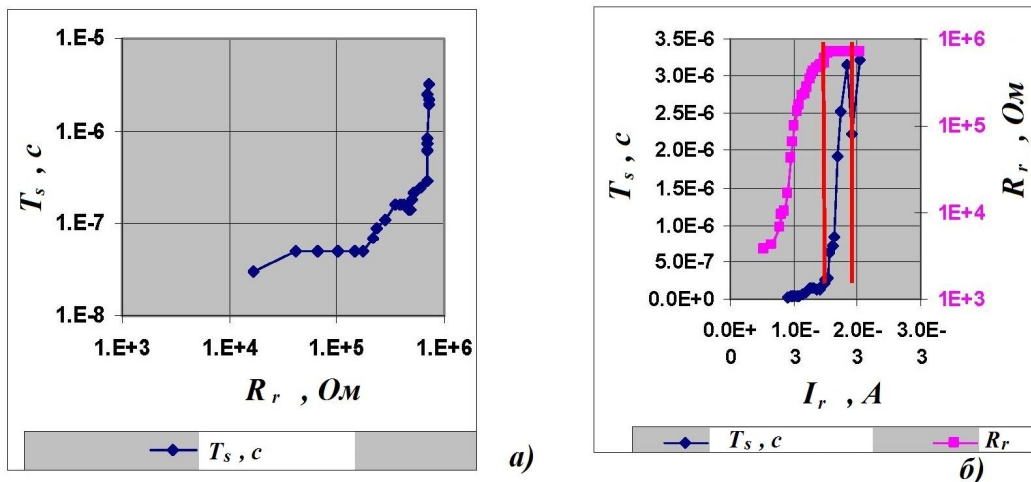


Рис. 7. Залежність тривалості імпульсу ввімкнення від опору вимкнення (а) та струму програмування (б). Пристрій має BDL-структуру з резистивними контактами типу С-С

Припустимо, що домінуюча частина  $R_s$  розташована на поверхні електроду і кристалічний матеріал слугує в якості штучно утвореного (віртуального) контакту з плівкою ХСН. Тоді ефективна площа віртуального контакту з електродом залежатиме від низькопольового опору електроду і  $R_{off.nes}$ . Найбільший опір електроду спостерігають за максимальної кількості кристалічного матеріалу в об'ємі ХСН. Мінімальне значення  $R_{off.nes}$  також вимагає максимальної частки кристалічного матеріалу. Якщо застосувати нерезистивний електрод, то відсоток кристалічного матеріалу в плівці ХСН буде нижчим. Отже, наявність резистивного інтерфейсу, утвореного з карбону виду С-С (вуглець-вуглець), зменшує ефект шунтування кристалічних «ниток струму» в аморфному матеріалі.

Розглянемо питання, як можна змінити швидкість увімкнення пристрою ЕНП. Природно припустити, якщо встановити омичний контакт (низький опір) електрода, то  $R_s$ ,  $U_{in}$  і  $T_s$  будуть знижені. Є кілька альтернатив: змінити склад сплаву з тими ж матеріалами контактів, змінити матеріал контактів, увести проміжний контактний шар з низьким омичним опором між ХСН і основним електричним контактом або комбінувати ці методи.

У таблиці 1 представлені деякі експериментальні дані [2].

## Експериментальні дані

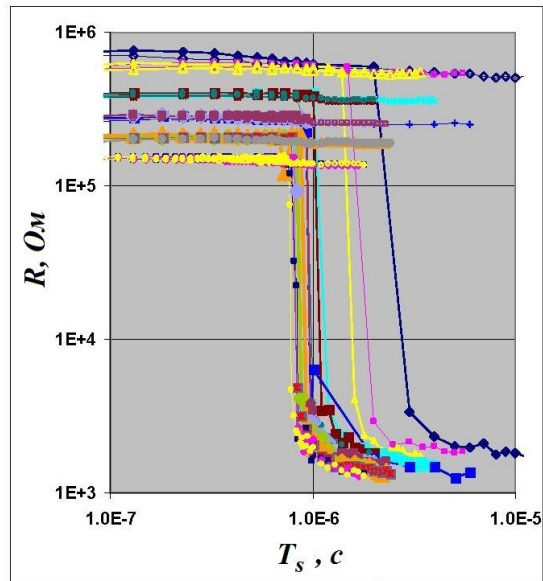
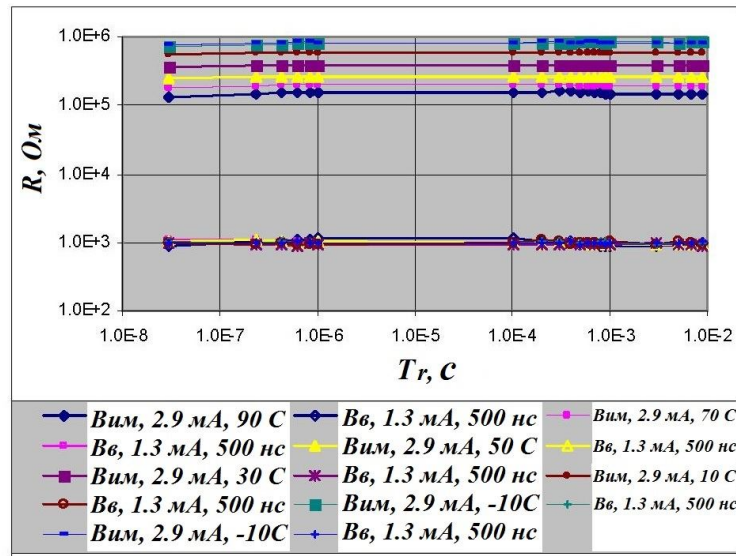
Сплав	Нижній електричний контакт (НЕК)	Верхній електричний контакт (ВЕК)	$T_s$ (при $I_{r_a}$ ), с	$T_s$ (при $1.2I_{r_a}$ ), с	Швидкість увімкнення: $I_{r_{min}}/I_{r_a} * 20$ нс
№225 CC BDL	C	C	3e-7	3e-6	0.4
№225 FF БП	TiAlN 2 мОм см	TiW	3e-7	2.8e-6	2.7
№225 FF BDL	TiAlN 5 мОм см	Ti-TiN-Ti	3e-8	7e-8	1.2
НРС FF BDL	TiAlN 5 мОм см	Ti-TiN-Ti	1.5e-8	4e-8	1.35
НРС FF BDL	TiAlN-C	Ti-TiN-Ti	2e-8	4e-8	1.1
НРС ЕПЛ	C	C-MoN	4e-8	5e-8	1.2
НРС ЕПЛ	MoN	C-MoN	5e-8	2e-7	1.5

де №225 – сплав  $Ge_2Sb_2Te_5$ , CC – вуглецеві контакти, FF – металеві контакти, БП – бічне перемикання стану ХСН, BDL – шар електричного пробою ХСН, НРС – низькорезистивний сплав ХСН, ЕПЛ – електронно-променева літографія.

З наведених вище даних зробимо такі висновки. Перехід на сплав з більш низьким опором покращує швидкість увімкнення, особливо за  $1.2I_{r_a}$ . Матеріал і опір верхнього контакту має менший вплив на швидкість увімкнення. Додавання Ті-шару до верхнього контакту значно покращує швидкість увімкнення. Це, імовірно, пов'язано з тим, що ввімкнення Ті-шару у плівку сплаву GST №225 забезпечує гарний омичний контакт. Швидкість вимкнення мало залежить від модифікацій верхнього контакту, але залежить від провідності нижнього контакту і сплаву ХСН. Провідність шару ХСН, виготовленого за допомогою ЕПЛ, є вищою, і тому швидкість вимкнення ЕНП навіть із використанням вуглецевих контактів зростає.

**Температурна залежність швидкості програмування.** Опір вимкнення змінюється з температурою тому, що генерація носіїв струму в ХСН є активним процесом. На рис. 8 видно різні початкові рівні вимкнення. Оскільки тривалість імпульсу ввімкнення збільшується за зменшення температури, то кожна з відповідних кривих  $RT$  падає до рівня ввімкнення. Тривалість імпульсу, необхідного для досягнення певного рівня опору, зменшується за збільшення температури, тобто швидкість увімкнення пристрою збільшується [3].

Зробимо кілька висновків: ( $R_s-dU/dI$ ),  $I_s$  та  $I_r$  практично не залежать від температури; підвищення опору програмування супроводжується безперервним зростанням енергії активації; швидкість стирання залежить від відношення  $I_r$  до  $I_{r_a}$  (рис. 1), за якого  $R_r/T_r$  перетинає демаркаційну лінію  $T_r=20$  нс, менше значення відношення струмів вимкнення відповідає більшій швидкості перемикання;  $T_s$  зменшується зі збільшенням температури, тобто зі збільшенням енергії активації в діапазоні від 0,05 до 0,3eВ (рис. 8); для пристроїв із вуглецевими контактами CC  $T_r$  не залежить від температури в діапазоні 20 нс – 10 мс (рис. 9).

Рис. 8. Залежність швидкості ввімкнення  $T_s$  від температуриРис. 9. Залежність  $T_r$  в діапазоні температур 10 – 90 °С для пристрою GST №225 СС BDL

**Матеріал електродів.** Покажемо, що вуглецеві контакти абсолютно унікальні для застосування як матеріали для електродів. Перевага вуглецю у зміні опору з відносно резистивного матеріалу в матеріал з високою провідністю, але тільки в безпосередній близькості від зони контакту до ХСН. Джоулевій нагрів під час пропускання струму через стек C-SiNx-C зумовлює зміни. При цьому SiNx діє як шар електричного пробую, який локалізує роботу пристрою в безпосередній близькості до зони пробую [3]. На рис. 10 показано, що під час проходження струму через пристрій він стає все більш і більш провідним, і такі зміни є постійними. Спочатку опір пристрою приблизно рівний  $1e6$  Ом, далі, подаючи електричний сигнал зі струмом 2 мА і напругою 3В, трапляється пробій, після чого пристрій змінює свій опір до  $1e4$  Ом. Подальше збільшення струму призводить до поступового зниження опору пристрою від  $1e3$  Ом до 100 Ом.



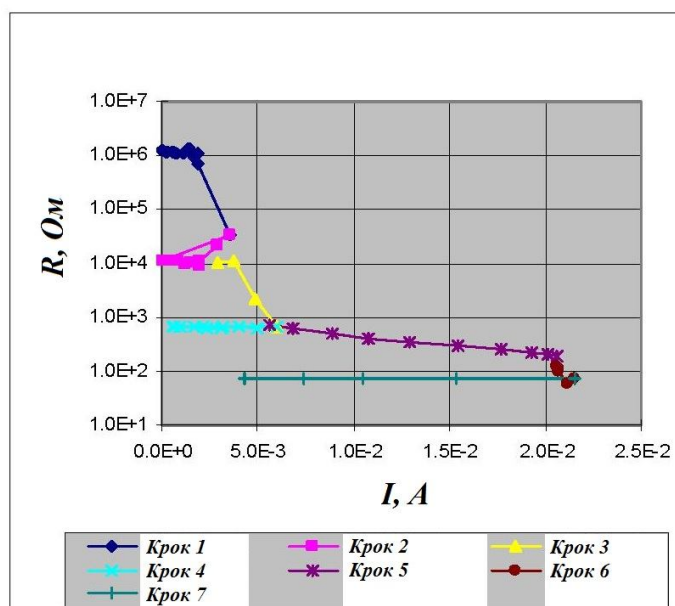


Рис. 10. Електричне формування комірки C-SiNx-C

Прогрівання таких пристроїв за температури 350 °С протягом 72 годин не призводить до подальших змін. Для невимкненого пристрою прогрівання за температури нижчої за 350 °С не призводить до підвищення провідності [3]. Результати занесені до таблиці 2.

Таблиця 2

## Результати термообробки

Опір до перемикання C-SiNx-C, Ом	Опір після застосування електричних імпульсів, Ом	Опір тих самих пристроїв після випалювання за температури 350 °С протягом 72 годин (повільне охолодження), Ом
1.96e6	444	511
1.25e6	3.46e4	3.42e4
8.15e5	1.5e4	1.4e4
1.56e6	210	289
2.7e6	814	886
1.7e6	Без перемикання	1.3e5
1.2e6	Без перемикання	9.1e4
1.4e6	Без перемикання	9.4e4
9.6e5	Без перемикання	8.5e4

Отже, можна зробити висновок, що вуглецевий контакт сформовано в безпосередній близькості від зони пробою, де температура програмування досягає 650 – 700 °С. Це забезпечує перевагу ізотропної теплопровідності, при якій перпендикулярна до площі пристрою теплопровідність значно перевищує, її значення до його бічної сторони, і допомагає ефективно термічно ізолювати пристрій. Цей експеримент передбачає, що вуглецеві контакти змінюють опір лише вздовж шляху струму й залишаються більш електрично- і термічно-резистивними за відхилення від поточного шляху. Таким чином бічні тепловтрати через товщину контактів мінімізуються. Отже, ЕНП типу BDL, де нижній контакт виготовлений із вуглецю, перемикається швидше, ніж із TiAlN. Але варто зазначити, що швидкість вимкнення може зрости, якщо нижній контакт використовує сплав TiAlN з вищим значенням опору.

## Висновки

Порогове значення опору перемикання  $Rr_0$  ЕНП змінюється пропорційно до товщини плівки ХСН. Для опору пристрою за низького електричного поля  $R_{ХСН}$  така залежність не справджується, хоча фронт кристалізації матеріалу поширюється від катода до анода вздовж шляху проходження струму. Експериментальні досліди показують, що кристалічні області фазозмінного сплаву GST №225 є віртуальними контактами до верхнього інтерфейсу електрода (анода), що призводить до більш швидкого перемикання фазових станів КП, тому швидкість увімкнення не залежить від контакту катода, але суттєво залежить від контакту анода. Якщо зробити зв'язок анода із матеріалом ХСН більш слабким, тобто менш резистивним, то збільшується швидкість увімкнення. Матеріал анода обирають на підставі провідності сплаву ХСН, що безпосередньо прилягає до нього, з метою мінімізувати низькопольовий опір інтерфейсу. Як показують експерименти, швидкість вимкнення ЕНП із більш низькою резистивністю матеріалу контактів переважно визначається побічними тепловтратами через нижній контакт (катод) та суміжні області плівки ХСН, тому швидкість вимкнення (перезапису, скидання) може суттєво залежати від контакту катода (як його матеріалу, так і геометрії), але бути нечутливою до змін контакту анода. Це свідчить про наявність полярності проходження струму через КП. Отже, більш високої швидкості вимкнення ЕНП можна досягти за умови мінімізації побічних втрат тепла на катоді. Аморфний вуглець має властивість змінювати опір лише в напрямку протікання струму, тому використання аморфного вуглецю в якості матеріалу катода є оптимальним.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ovshinsky S. R. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures / S. R. Ovshinsky // Physical Review Letters. – 1968. – № 21. – P. 1450 – 1453.
2. Phase Change Memory / H.-S. Philip Wong [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2010. – Vol. 98, №. 12. – P. 2201 – 2227.
3. Phase change memory technology [Електронний ресурс] / Vipin Rajendran [et al.] / IBM Research. – 2009. Режим доступу: [http://www.itrs.net/ITWG/Beyond\\_CMOS/2010Memory\\_April/Proponent/Nanowire%20PCRAM.pdf](http://www.itrs.net/ITWG/Beyond_CMOS/2010Memory_April/Proponent/Nanowire%20PCRAM.pdf).
4. Костылев С. Электронное переключение в аморфных полупроводниках / С. Костылев, В. Шкут. – Наукова думка: Київ, 1978. – с. 203.

**Слободян Іван Володимирович** – асистент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення. Вінницький національний технічний університет.