

ТЕХНОЛОГІЇ ТВЕРДОТІЛЬНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ

Булатецький В.В. (ORCID: 0000-0002-9883-4550),
Булатецька Л.В. (ORCID: 0000-0002-7202-826X)
Ступінь А.П. (ORCID: 0009-0002-8826-1952)
Волинський національний університет імені Лесі Українки

TECHNOLOGIES OF SOLID-STATE DRIVES

Bulatetskyi V.V., Bulatetska L.V., Stupin A.P.
Lesya Ukrainka Volyn National University

Abstract. The basis of the modern computer system has become solid-state drives, as carriers of system partitions, or high-speed data stores, its have replaced hard drives. The paper examines the peculiarities of the development of technologies for the manufacture of solid-state drives and the influence of these technologies on the characteristics of such devices. The memory cell and features of its construction are considered. A review of hardware solutions for including a solid-state drive in a computer system is made. Using experimental examples, the influence of such solutions on speed parameters during operation is analyzed. Separate problems that arise both in the process of including SSD in the system are considered, and ways to solve them are proposed.

Keywords: solid-state drive, floating-gate, NAND, SATA, PCIe, M.2.

Вступ. В сучасних обчислювальних системах в якості основних пристроїв-носіїв (накопичувачів) для збереження файлів операційної системи (завантажувальні пристрої) зараз переважно використовують твердотільні накопичувачі (SSD – State-Solid Drive). До недавнього часу в якості таких носіїв використовували жорсткі диски (HDD – Hard Disk Drive), проте вони суттєво поступалися наступникам у швидкодії, що впливало на загальну продуктивність системи в цілому, а зокрема, на швидкість завантаження системи, додатків та реакції на дії користувача. Жорсткі диски не вийшли з ужитку, адже вони пропонують вищі показники ємності при тій же вартості та використовуються для збереження великих об'ємів даних, коли не критично важлива швидкодія, адже завдяки своїй технологічній природі, допускають на кілька порядків вищу кількість перезаписів комірок пам'яті, а, отже, і довшу тривалість експлуатації таких пристроїв та вищу надійність збереження даних. І хоча надійність збереження інформації на SSD помітно нижча, вона достатня для їх використання в якості системних завантажувальних пристроїв в період часу експлуатації системи [1]. Твердотільні накопичувачі можуть використовувати команди та апаратні інтерфейси, які використовують і жорсткі диски, але це суттєво обмежує їхні швидкісні параметри, тому для них використовують більш ефективні апаратні рішення для досягнення оптимальних значень їх експлуатаційних характеристик та спеціалізовані набори команд, пов'язані із специфікою їх будови, експлуатації та обслуговування.

Постановка проблеми. На практиці для ефективного використання усіх переваг SSD в реальних системах необхідно проаналізувати особливості технологій виготовлення твердотільних накопичувачів для вдалого підбору моделей пристроїв для включення їх у конкретні обчислювальні системи як на етапі побудови так і на етапах їх модернізації. Для отримання систем з оптимальними параметрами необхідно систематизувати інформацію, що стосується апаратних інтерфейсів твердотільних накопичувачів, швидкісних параметрів цих інтерфейсів та особливостей налагодження операційних систем для використання в них SSD в тій або іншій ролі.

В основі функціонування комірки пам'яті твердотілого накопичувача, лежить принцип роботи польового транзистора (MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) з плаваючим затвором (floating-gate), на базі якого і побудована така комірка. Звичайний польовий транзистор (без плаваючого затвору) виготовляється з трьох типів матеріалів: металу (metal), оксиду в якості діелектрика (oxide) та напівпровідника (semiconductor) (рис.1). В основі його роботи лежить принцип керування потоком носіїв заряду (а, отже і струмом) між джерелом (source) та витокком (drain) у напівпровіднику за допомогою електричного поля, яке створюють між підкладкою (body) та затвором (gate).

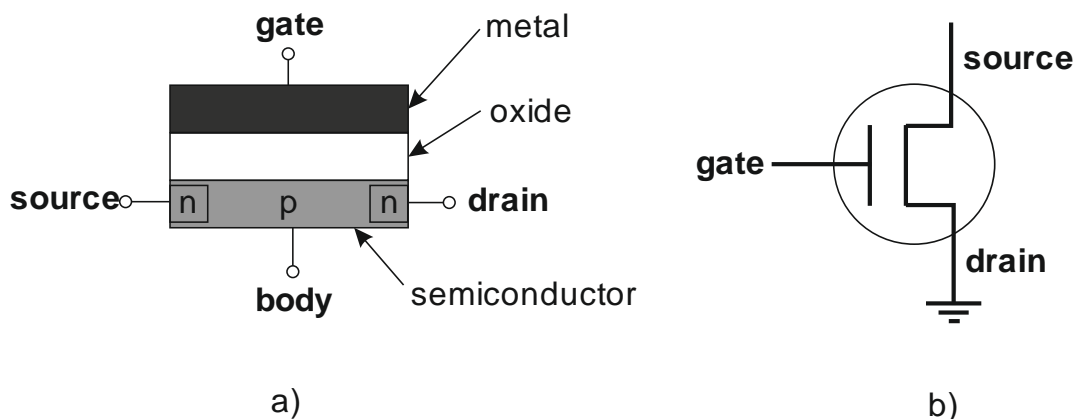


Рис. 1. Структура польового транзистора (MOSFET) – а, його спрощене позначення – б.

На відміну від звичайного польового транзистора, польовий транзистор з плаваючим затвором у шарі діелектрика містить додатковий шар, так званий «плаваючий затвор», призначений для захоплення та вивільнення носіїв заряду завдяки тунельному ефекту і здатний утримувати такі носії десятки років (рис. 2). [2-4]

Таким чином, транзистори з плаваючим затвором здатні перебувати як мінімум у двох стійких станах і їх можна використати в якості елементарних комірок пам'яті для запису як мінімум 1 біта інформації. На їх основі будують пристрої Flash-пам'яті, вперше розробленої Фудзіо Масуока (Fujio Masuoka), інженером компанії Toshiba, в 1980 році [5]. Такі розробки базуються на логіці NOR (Not-OR – АБО-НЕ) та пізніше (1987р.) NAND (Not-AND – І-НЕ) (рис.3) [6].

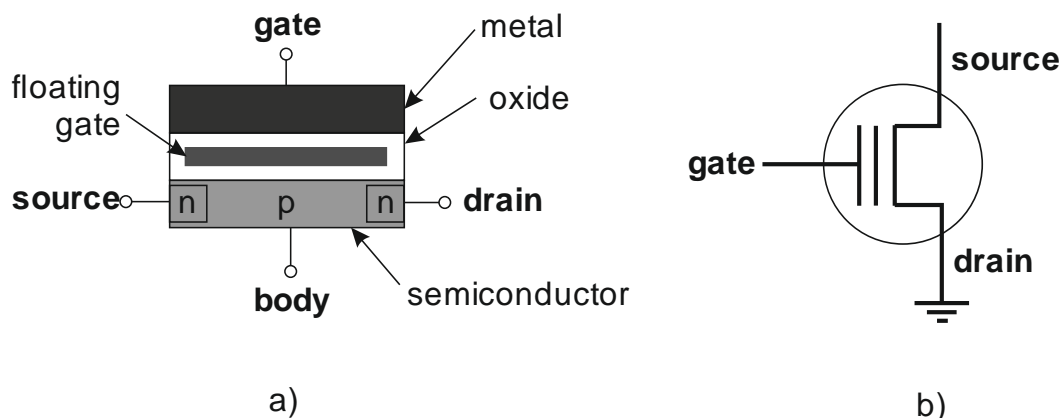


Рис. 2. Структура польового транзистора з плаваючим затвором (MOSFET) – а, його спрощене позначення – б.

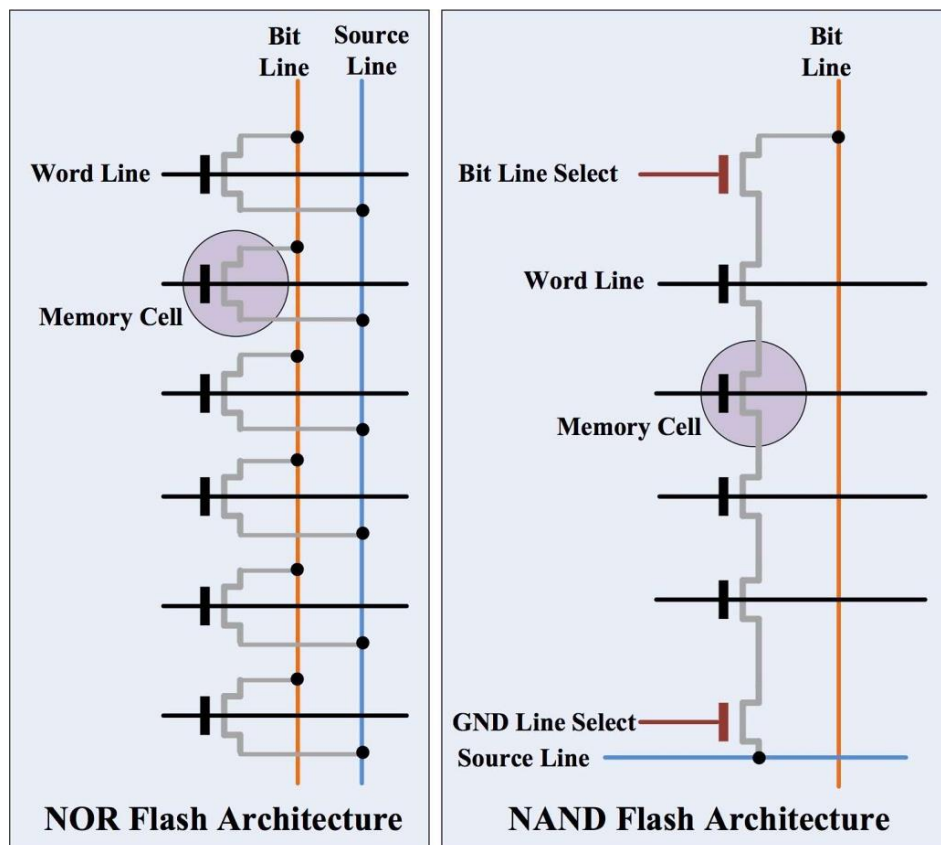


Рис.3. NOR Flash (ліворуч), NAND Flash (праворуч) [6].

У випадку з NOR є можливість отримувати незалежний доступ до будь-якої із комірок пам'яті, адже кожен транзистор напряму підключений до бітової лінії (Bit-Line). Таку пам'ять будували у вигляді двовимірного масиву, проте вона була складною у технічній реалізації за рахунок великої кількості ліній. При NAND-організації транзистори підключені послідовно до бітової лінії, звертання до такої пам'яті складніше і вимагає доступ до усіх транзисторів у послідовності для зміни стану хоча б одного із них. Тому пристрої побудовані на Flash NAND працюють не з окремими комірками, а із блоками комірок, при запису однієї комірки потрібно перезаписувати усі інші комірки у блоці. Застосування NAND дозволило суттєво спростити технологію виготовлення за рахунок зменшення кількості ліній та зробити пристрої значно більш компактнішими у порівнянні з NOR.[6]

Сучасні технології здатні реалізувати дозоване захоплення носіїв заряду плаваючим затвором, а, отже, реалізувати більшу кількість станів, тобто отримати можливість зберігати 2, 3 і більше бітів інформації у комірці на базі транзистора з плаваючим затвором. На даний час виділяють два типи комірок: SLC (single-level-cell – один рівень (2 стани) комірки і, відповідно, 1 біт ємності комірки) та MLC (multi-level-cell – багаторівнева комірка, більше 1 біта у комірці). Спостерігається тавтологія в аббревіатурі, коли до MLC відносять 2-бітові комірки (теж названі MLC), 3-бітові комірки (TLC – triple-level-cell) та 4-бітові (QLC – quad-level-cell) [7, 8]. Проте із зростанням кількості біт на комірку падає швидкість звертання до комірок та кількість перезаписів. Обмежена кількість перезаписів пов'язана з деградацією матеріалу, в якому знаходиться плаваючий затвор, що стає все більш помітною при зростанні циклів захоплення та вивільнення носіїв, і, при певному критичному значення циклів перезапису плаваючий

затвор втрачає властивість утримувати заряд. Чим більше біт можна зберегти у комірці, тим більш така деградація відчутна. Тому найбільшу кількість циклів перезапису мають SLC, а найнижчу QLC (тим більше PLC (penta-level-cell), які вже розроблені, але ще не надійшли у масове виробництво [9]). Це ж стосується і швидкодії: SLC – найшвидші у роботі, QLC – найповільніші [7]. Проте на практиці контролер пристрою слідкує за рівномірним використанням усіх комірок (Wear leveling), щоб максимально продовжити час життя твердотілого накопичувача, але при його заповненні при такій процедурі витрачається відносно багато часу на пошук більш «свіжих» комірок, тому швидкодія заповнених пристроїв може суттєво падати. Такі недоліки можна вважати несуттєвими в більшості випадків, коли час експлуатації на відмову може бути набагато більшим, ніж час експлуатації пристрою, пов'язаний з циклом життя обчислювальної системи, пов'язаним з моральним старінням. [1]

Для того, щоб зробити пристрої ще більш компактними було використано технологію 3D, тобто розміщення у пристрої комірок не у площині, а у об'ємі, у вигляді багатопланових утворень, що дозволило не тільки більш ефективно використати простір, але і підняти швидкодію за рахунок швидшого звертання до комірок пам'яті (рис. 4).[10]

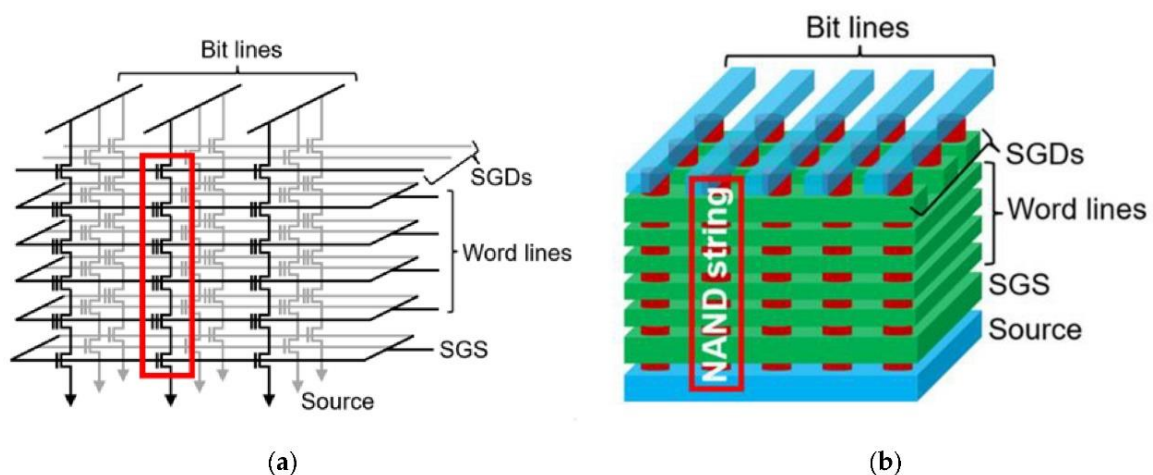


Рис.4. Архітектура масиву 3D NAND (a) – схеми рядків NAND 3×3
і (b) рядків NAND 3×5 .

Фізичні властивості компонент, з яких будуються SSD, звичайно, в першу чергу впливають на характеристики кінцевих пристроїв, проте не менш важливу роль відіграє спосіб включення таких пристроїв у реальні системи, тобто використання тих або інших інтерфейсів для роботи пристрою в складі апаратних засобів. Для жорстких дисків був і залишається актуальним інтерфейс SATA з пропускною здатністю до 600 MB/s (SATA 3.0). SSD подолав це обмеження, мігрувавши на форм-фактор M.2 (спочатку все таки з підключенням до SATA, а потім з прямим підключенням до швидкісної шини PCI Express (PCIe) швидкість якої, в залежності від версії може сягати 256 GB/s) [11].

Результати дослідження та їхнє обговорення. Нами було досліджено поведінку типового жорсткого диску Seagate ST2000DM001 (SATA-3) та двох типових твердотілих накопичувачів (заповнених не більше ніж на 40%) SanDisk X400 M.2 2280 (M.2 SATA-3) та Samsung SSD 980 (M.2 NVMe) у реальних системах на предмет швидкодії і її залежності від типу накопичувача та способу його підключення. Тестування проводилось за допомогою CrystalDiskMark [12]. У якості тестових системи використано наступні конфігурації:

1. CPU: i3-10100F, MB: ASUS Prime H510, RAM: 16GB DDR4, Windows 11 Pro x64.
2. CPU: i5-6300U, MB: HP 8079, RAM: 16GB DDR4, Windows 11 Pro x64.

Обидві системи дали приблизно однакові результати, розкид результатів вимірювання не перевищував 2%, що, очевидно, пояснювалось різним станом системи в різний момент вимірювання та дещо відмінною апаратною базою на рівні чіпсету, процесора та характеристик модулів оперативної пам'яті.

Приклади тестування HDD та двох SSD подано на рис. 5 [1].

Провівши аналіз отриманих результатів, можна помітити суттєвий приріст швидкості читання/запису у декілька разів при переході з HDD на SSD на одній і тій самій шині SATA (рис. 5, (a) та (b)) при послідовному доступі (SEQ1M). Проте більш вражаючим є приріст при довільному(випадковому) доступі стандартними блоками 4кБ (RND4K) більше ніж на 2 порядки. Порівняння випадку b та c (рис. 5) розкриває потенціал SSD при зміні шини з SATA на PCIe, що проявляється у зростанні швидкості читання/запису майже на порядок, хоча при довільному доступі зростання швидкості незначне при запису (незначне зростання), а при читанні – незначне спадання, що в нашому випадку викликано особливістю технології організації комірок (NVMe).

	Read (MB/s)	Write (MB/s)
SEQ1M Q8T1	172.51	174.31
SEQ1M Q1T1	172.44	168.86
RND4K Q32T1	1.61	1.25
RND4K Q1T1	0.64	1.25

a)

	Read (MB/s)	Write (MB/s)
SEQ1M Q8T1	555.41	509.80
SEQ1M Q1T1	516.69	456.89
RND4K Q32T1	328.27	283.06
RND4K Q1T1	39.30	90.16

	Read (MB/s)	Write (MB/s)
SEQ1M Q8T1	3135.31	1986.96
SEQ1M Q1T1	1058.13	1635.80
RND4K Q32T1	253.80	352.68
RND4K Q1T1	51.69	106.70

b)

c)

Рис. 5. Приклад тестування швидкісних характеристик за допомогою CrystalDiskMark:

- a) HDD Seagate ST2000DM001 (SATA-3) – IDE(AHCI) – SATA 3.0;
- b) SSD SanDisk X400 M.2 2280 (SATA-3) – M.2 – SATA 3.0;
- c) Samsung SSD 980 (NVMe) – M.2 – PCIe 4.0.

Ще одна проблема, яка виникає в процесі введення у експлуатацію SSD замість HDD, полягає у ступені складності заміни одного типу пристрою на інший. На початкових етапах така заміна вимагала переустановлення операційної системи, а також «тонкого» її налагодження для роботи з SSD. Це пов'язано в першу чергу з процесами дефрагментації носіїв: для HDD, очевидно, це актуально для зменшення часу доступу до окремих блоків носія, проте для SSD така процедура не має сенсу, адже до усіх блоків час доступу однаковий і не залежить від їх фізичного розміщення у пристрої. Це ж стосується і таких технологій як NCQ і подібних. З іншого боку твердотільні накопичувачі потребують технологій TRIM, Wear leveling тощо. [13]

Найбільш вірним, з нашої точки зору спосіб включення SSD у систему є «чиста» установка на новий накопичувач операційної системи з її подальшим налагодженням для подальшої експлуатації, що гарантує активацію відповідних модулів ОС, що забезпечують коректне функціонування пристрою і розкриття усіх його переваг. Проте це може бути досить трудомістким процесом. Значно простішим способом «адаптації» ОС до SSD є використання такого програмного засобу як Tweak-SSD [14] або аналогічного, який не вимагає особливих знань у пересічного користувача (рис. 6) і дозволить задіяти засоби операційної системи для роботи з твердотільним накопичувачем.

Найсучасніші операційні системи більш «адаптовані» до заміни HDD на SSD в процесі експлуатації без перевстановлення. Операційні системи здатні самостійно виявляти такі накопичувачі і перелаштовуватись під роботу з ними. Тобто перехід зводиться до перенесення (копіювання) системних розділів з одного пристрою на інший зручним для користувача способом: або засобами самої операційної системи [15], або за допомогою стороннього програмного забезпечення, такого як, наприклад Acronis TrueImage [16].

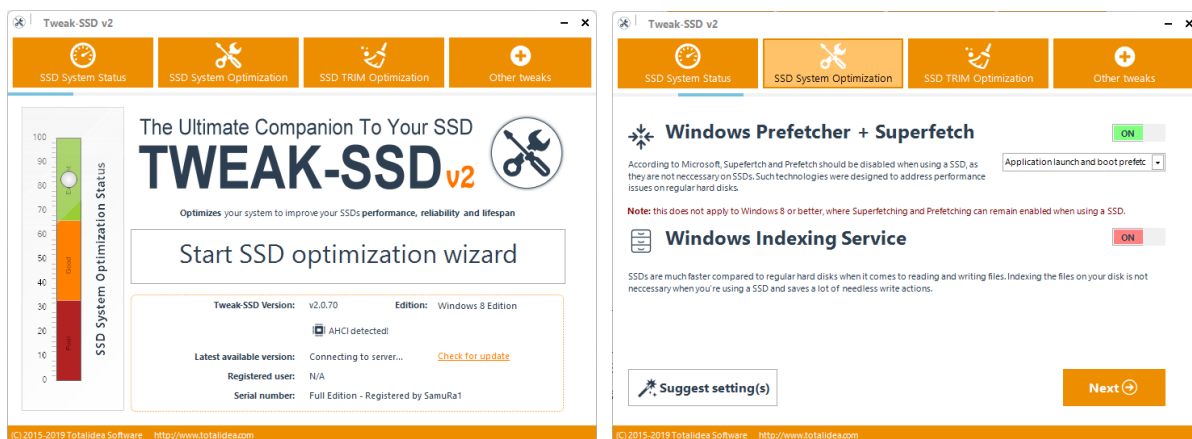


Рис. 6. Інтерфейс Tweak-SSD.

Висновки. Таким чином, розглянувши особливості технологій виготовлення твердотільних накопичувачів, апаратні засоби для їх підключення та особливості їх роботи з операційними системами на фоні беззаперечних переваг над жорсткими дисками, таких як висока швидкодія, низьке енергоспоживання, стійкість до механічних навантажень, варто наголосити на ряді недоліків таких пристроїв, а саме порівняно висока вартість, менша кількість циклів перезапису комірок у порівнянні з жорсткими дисками, потреба у відповідному апаратному забезпеченні та актуальних операційних систем.

Проте, враховуючи вказані недоліки, можна стверджувати, що використання таких пристроїв однозначно суттєво підвищить продуктивність в цілому і, відповідно, призведе до підвищення ефективності обчислювальної системи в процесі її експлуатації. Твердотільні накопичувачі в окремих випадках вимагають додаткової уваги з боку адміністраторів систем, проте це нівелюється тими перевагами, які вони надають. Адже проблеми, пов'язані з недоліками SSD вирішуються з використанням нових підходів при розробці сучасних операційних систем, введенням допоміжних апаратно-програмних рішень при виготовленні пристроїв, або здатністю проявлятися таким недолікам за час, порівняно більший, ніж час експлуатації обчислювальної системи до її планової заміни.

Бібліографія

1. Булатецький В. В. Твердотільні накопичувачі, їх переваги та недоліки. *Науково-практична конференція, присвячена 130-річчю від дня народження М. П. Кравчука* : матеріали конф., м. Луцьк, 11 жовт. 2022 р. Луцьк. С. 120–123.
2. What is a MOSFET? It's Types, Working, Circuit, and Applications. *Electronics For You*. URL: <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/mosfet-basics-working-applications> (date of access: 15.03.2023).
3. Sliwa C. What is floating gate transistor (FGT)? | Definition from TechTarget. *Storage*. URL: <https://www.techtarget.com/searchstorage/definition/floating-gate> (date of access: 15.03.2023).
4. What is the MOSFET: Basics, Working Principle and Applications. *ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students*. URL: <https://www.elprocus.com/mosfet-as-a-switch-circuit-diagram-free-circuits> (date of access: 15.03.2023).
5. Fujio Masuoka Invents Flash Memory : History of Information. *History of Information*. URL: <https://historyofinformation.com/detail.php?entryid=2330> (date of access: 15.03.2023).
6. Avinash Aravindan. Flash 101: NAND Flash vs NOR Flash. 2018. URL: <https://www.embedded.com/flash-101-nand-flash-vs-nor-flash> (дата звернення: 15.03.2023).
7. Difference Between SLC, MLC, TLC & QLC NAND SSDs: Which One is Better?. *Hardware Times*. URL: <https://www.hardwaretimes.com/difference-between-slc-mlc-tlc-qlc-nand-ssds-which-one-is-better> (date of access: 15.03.2023).
8. Тип пам'яті SSD накопичувачів. Статті компанії «Комплектуючі для комп'ютерної техніки 2400». *Комплектуючі для комп'ютерної техніки 2400*. URL: <https://2400.com.ua/ua/a434821-tip-pamyati-ssd.html> (дата звернення: 15.03.2023).
9. Pires F. Solidigm Introduces Industry-First PLC NAND for Higher Storage Densities. Tom's Hardware. URL: <https://www.tomshardware.com/news/solidigm-plc-nand-ssd> (date of access: 15.03.2023).
10. Recent Progress on 3D NAND Flash Technologies. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/24/3156> (date of access: 15.03.2023).
11. PCI Express 6.0 Specification | PCI-SIG. *Welcome to PCI-SIG | PCI-SIG*. URL: <https://pcisig.com/pci-express-6.0-specification>. (date of access: 15.03.2023)
12. Crystal Dew World. *Crystal Dew World [en]*. URL: <https://crystalmark.info/en/>. (date of access: 15.03.2023).
13. SSD Performance FAQs | Support | Samsung Semiconductor Global. Samsung Semiconductor Global. URL: <https://semiconductor.samsung.com/consumer-storage/support/faqs/03/> (date of access: 15.03.2023).
14. Download Tweak-SSD Pro 2.0.70. *Taiwebs.com*. URL: <https://en.taiwebs.com/windows/download-tweak-ssd-pro-1704.html> (date of access: 15.03.2023).
15. Hopping C. How to move Windows 10 from an HDD to an SSD | IT PRO. *IT PRO*. URL: <https://www.itpro.co.uk/operating-systems/26152/how-to-move-windows-10-from-hdd-to-ssd> (date of access: 15.03.2023).
16. Ivy. Acronis True Image Clone to SSD - How to Guides. *Best Backup, Recovery, Clone Software for Any Devices and Everyone | AOMEI Data Protection*. URL: <https://www.ubackup.com/clone/acronis-true-image-clone-to-ssd-6988.html> (date of access: 15.03.2023).

References

1. Bulatetskyi V. V. Tverdotilni nakopychuvachi, yikh perevahy ta nedoliky. *Naukovo-praktychna konferentsiia, prysviachena 130-richchiiu vid dnia narodzhennia M. P. Kravchuka* : materialy konf., m. Lutsk, 11 zhovt. 2022 r. Lutsk. S. 120–123.

2. What is a MOSFET? It's Types, Working, Circuit, and Applications. *Electronics For You*. URL: <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/mosfet-basics-working-applications> (date of access: 15.03.2023).
3. Sliwa C. What is floating gate transistor (FGT)? | Definition from TechTarget. *Storage*. URL: <https://www.techtarget.com/searchstorage/definition/floating-gate> (date of access: 15.03.2023).
4. What is the MOSFET: Basics, Working Principle and Applications. *ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students*. URL: <https://www.elprocus.com/mosfet-as-a-switch-circuit-diagram-free-circuits> (date of access: 15.03.2023).
5. Fujio Masuoka Invents Flash Memory : History of Information. *History of Information*. URL: <https://historyofinformation.com/detail.php?entryid=2330> (date of access: 15.03.2023).
6. Avinash Aravindan. Flash 101: NAND Flash vs NOR Flash. 2018. URL: <https://www.embedded.com/flash-101-nand-flash-vs-nor-flash> (дата звернення: 15.03.2023).
7. Difference Between SLC, MLC, TLC & QLC NAND SSDs: Which One is Better?. *Hardware Times*. URL: <https://www.hardwaretimes.com/difference-between-slc-mlc-tlc-qlc-nand-ssds-which-one-is-better> (date of access: 15.03.2023).
8. Тип пам'яті SSD nakopychuvachiv. Статті компанії «Komplektuiuchi dlia kompiuternoї tekhniky 2400». *Komplektuiuchi dlia kompiuternoї tekhniky 2400*. URL: <https://2400.com.ua/ua/a434821-tip-pamyati-ssd.html> (data zvernennia: 15.03.2023).
9. Pires F. Solidigm Introduces Industry-First PLC NAND for Higher Storage Densities. Tom's Hardware. URL: <https://www.tomshardware.com/news/solidigm-plc-nand-ssd> (date of access: 15.03.2023).
10. Recent Progress on 3D NAND Flash Technologies. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/24/3156> (date of access: 15.03.2023).
11. PCI Express 6.0 Specification | PCI-SIG. *Welcome to PCI-SIG | PCI-SIG*. URL: <https://pcisig.com/pci-express-6.0-specification>. (date of access: 15.03.2023)
12. Crystal Dew World. *Crystal Dew World [en]*. URL: <https://crystalmark.info/en/>. (date of access: 15.03.2023).
13. SSD Performance FAQs | Support | Samsung Semiconductor Global. Samsung Semiconductor Global. URL: <https://semiconductor.samsung.com/consumer-storage/support/faqs/03/> (date of access: 15.03.2023).
14. Download Tweak-SSD Pro 2.0.70. *Taiwebs.com*. URL: <https://en.taiwebs.com/windows/download-tweak-ssd-pro-1704.html> (date of access: 15.03.2023).
15. Hopping C. How to move Windows 10 from an HDD to an SSD | IT PRO. *IT PRO*. URL: <https://www.itpro.co.uk/operating-systems/26152/how-to-move-windows-10-from-hdd-to-ssd> (date of access: 15.03.2023).
16. Ivy. Acronis True Image Clone to SSD - How to Guides. *Best Backup, Recovery, Clone Software for Any Devices and Everyone | AOMEI Data Protection*. URL: <https://www.ubackup.com/clone/acronis-true-image-clone-to-ssd-6988.html> (date of access: 15.03.2023).