



**Матеріали LV науково-технічної конференції
підрозділів Вінницького національного
технічного університету
(НТКП ВНТУ–2026)**

24-27 березня 2026 року

Збірник доповідей

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Матеріали LV науково-технічної конференції
підрозділів Вінницького національного
технічного університету (НТКП ВНТУ–2026)

24-27 березня 2026 року

Збірник доповідей

Електронне наукове видання

Вінниця
ВНТУ
2026

Видається за рішенням Вченої ради Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Головний редактор: В. В. Біліченко
Відповідальний за випуск: І. Ю. Єпіфанова

Робоча група з підготовки конференції:
Голова робочої групи:
проректор з наукової роботи ВНТУ І. Ю. Єпіфанова

Члени робочої групи:

декани факультетів, директор Інституту Конфуція ВНТУ;
В. М. Шпігунов, начальник РВВ ВНТУ;
Г. М. Багдасар'ян, провідний інженер РВВ ВНТУ;
О. О. Кушнір, провідний інженер РВВ ВНТУ;
С. Г. Могила, інженер 1-ї категорії РВВ ВНТУ.

Матеріали LV науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2026) : збірник доповідей [Електронний ресурс]. – Вінниця : ВНТУ, 2026. – (PDF, 3599 с.) ISBN 978-617-8163-95-2

Збірник містить тексти доповідей LV ювілейної регіональної науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів Вінницького національного технічного університету з участю працівників підприємств м. Вінниці та Вінницької області з загально-інженерних, технічних, гуманітарних та фундаментальних наук.

НТКП ВНТУ проводиться у вигляді конференцій факультетів та конференції Інституту Конфуція ВНТУ. Кожна конференція має власну тематику, оргкомітет, строки проведення пленарних та секційних засідань, та складається з однієї або кількох секцій.

УДК 001

ISBN 978-617-8163-95-2

© Вінницький національний технічний університет, укладання, оформлення, 2026

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВІДЕОПАМ'ЯТІ ГРАФІЧНИХ ПРОЦЕСОРІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто сучасний стан і основні тенденції розвитку відеопам'яті графічних процесорів за останні роки. Проаналізовано еволюцію стандартів відеопам'яті від GDDR6 і GDDR6X до GDDR7, а також окремо охарактеризовано високошвидкісну пам'ять типу HBM, що застосовується у професійних та високопродуктивних обчислювальних системах. Показано, що напрямками вдосконалення відеопам'яті є зростання пропускної здатності, підвищення енергоефективності, збільшення обсягу VRAM та оптимізація схем передачі даних.

Ключові слова: відеопам'ять, GDDR7, GDDR6, GDDR6X, HBM, графічні процесори, VRAM, пропускна здатність.

Abstract

The current state and main trends in the development of video memory of graphics processors in recent years are considered. The evolution of video memory standards from GDDR6 and GDDR6X to GDDR7 is analyzed, and high-speed memory of the HBM type, which is used in professional and high-performance computing systems, is also separately characterized. It is shown that the directions for improving video memory are increasing bandwidth, improving energy efficiency, increasing the volume of VRAM and optimizing data transfer schemes.

Keywords: video memory, GDDR7, GDDR6, GDDR6X, HBM, graphics processors, VRAM, bandwidth.

Вступ

Відеопам'ять [1-10] є важливим компонентом сучасних графічних процесорів, що визначає ефективність виконання операцій рендерингу, оброблення текстур, геометричних даних і проміжних буферів кадру. Зі зростанням складності графічних сцен, підвищенням роздільної здатності, частоти кадрів і використанням фізично коректних моделей освітлення вимоги до пропускної здатності, латентності та енергоефективності відеопам'яті постійно зростають. Удосконалення відеопам'яті розглядається як багатовимірна задача, що охоплює архітектурні, технологічні та алгоритмічні аспекти [1].

Результати дослідження

Одним з основних напрямків є підвищення пропускної здатності відеопам'яті (рис.1)



Рис. 1. Зовнішній вигляд мікросхем відеопам'яті

Сучасні GPU [1] використовують багатоканальні інтерфейси пам'яті та високошвидкісні стандарти, що дозволяють забезпечити одночасний доступ до великих масивів даних. Розвиток пам'яті типу GDDR6 та GDDR6X, а також широке впровадження HBM2e і HBM3 дали змогу істотно збільшити ефективну пропускну здатність без пропорційного зростання тактових частот [2]. Це особливо важливо для рендерингу з використанням трасування променів, де інтенсивний доступ до структур прискорення створює значне навантаження на підсистему пам'яті.

Другим важливим напрямком є зменшення латентності доступу до відеопам'яті. Для графічних конвеєрів критичним є не лише обсяг переданих даних, а й швидкість реакції пам'яті на запити обчислювальних блоків. Оптимізація контролерів пам'яті, використання більш ефективних схем попереднього вибіркового зчитування та вдосконалення кеш-ієрархій GPU дозволяють зменшити затримки та підвищити завантаження обчислювальних ядер [3].

Суттєвим напрямком удосконалення відеопам'яті є розвиток багаторівневої кеш-ієрархії. Сучасні GPU мають кілька рівнів кешу, зокрема локальні кеші потокових мультипроцесорів і загальний кеш останнього рівня. Оптимізація розмірів кешів, політик заміщення та когерентності сприяє зменшенню кількості звернень до зовнішньої відеопам'яті, що особливо актуально для рендерингу складних сцен з високим рівнем повторного використання даних [4].

Окремим напрямком є підвищення енергоефективності відеопам'яті. Зі зростанням пропускної здатності та обсягу VRAM [5] зростає і її енергоспоживання, що стає обмежувальним фактором для високопродуктивних графічних систем. Використання тривимірної інтеграції пам'яті, зменшення напруги живлення, динамічне керування частотами та адаптивне вимкнення невикористовуваних банків пам'яті дозволяють знизити енергетичні витрати без втрати продуктивності [5].

Важливим напрямком є збільшення ефективного обсягу відеопам'яті за рахунок компресії даних. Сучасні графічні процесори широко застосовують апаратні методи безвтратної компресії кольорових буферів, глибинних карт та текстур. Це дозволяє зменшити трафік між GPU і відеопам'яттю та підвищити ефективний обсяг VRAM, що є критичним для роботи з високими роздільними здатностями та складними матеріалами [6].

Наступним напрямком є оптимізація доступу до відеопам'яті на рівні програмної моделі. Сучасні графічні API надають розробникам засоби явного керування розміщенням ресурсів у пам'яті, що дозволяє мінімізувати фрагментацію та затримки доступу. Рациональне керування буферами, текстурними та структурами даних сприяє більш повному використанню пропускної здатності відеопам'яті [7].

Значну увагу приділяють також масштабованості відеопам'яті в багатопроцесорних і багаточипових графічних системах. Розвиток інтерконектів між GPU та підтримка спільного адресного простору дозволяють ефективно використовувати сукупний обсяг відеопам'яті в задачах рендерингу великих сцен і складних візуалізацій [8].

Останні роки відеопам'ять для графічних процесорів GPU розвивається значно швидшими темпами, ніж у попереднє десятиріччя, зосереджуючись на підвищенні пропускної здатності, енергоефективності та обсягу пам'яті відповідно до зростаючих вимог ігор, трасування променів і AI-задач. Основною лінією еволюції в 2021-2025 рр. стало поступове від GDDR6 і GDDR6X до нового стандарту GDDR7, що суттєво змінює характеристики VRAM у сучасних відеокартах.

Починаючи з 2018–2020 рр. масові GPU використовували GDDR6 і GDDR6X, перший забезпечував пропускну здатність до ~20-24 Gbps на контакт, а GDDR6X із PAM4-сигналізацією до ~24 Gbps і вище, що дозволило досягати пропускної здатності ~1000 ГБ/с у топових моделях серії NVIDIA RTX 30 та AMD RX 6000. Однак ці рішення стискалися із межами можливостей: температура, енерговитрати і обмеження сигналізації PAM4 поступово стримували подальше зростання швидкості.

Станом на 2023-2024 рр. JEDEC офіційно затвердив стандарт GDDR7, який суттєво підвищує пропускну здатність і енергоефективність порівняно з попередниками. У GDDR7 застосовано нову схему сигналізації PAM3, що дозволяє досягати до ~32 Gbps на контакт із зменшенням енергоспоживання на біт порівняно з GDDR6X, а пропускну здатність на 60 % вищу, що потенційно перевищує 1,5 ТБ/с у конфігураціях із широкою шиною пам'яті [turn0search7][turn0search8]. Виробники пам'яті, включно з Micron і SK Hynix, почали випуск чипів GDDR7 із тактовою частотою ~28 – 32 Gbps, а у перспективі до ~40 Gbps, разом із підтримкою вищих обсягів (16–24 Гбіт на чип) і можливістю використовувати модулі об'ємом 3 ГБ для конфігурацій з великим VRAM, що сприятиме появі моделей із 24 GB і більше пам'яті. Це дозволяє сучасним GPU краще справлятися з великими текстурами, трасуванням променів і високою роздільною здатністю, а також забезпечувати плавніше відтворення складних сцен.

Паралельно продовжують удосконалюватися стандарти High Bandwidth Memory, які застосовуються у професійних прискорювачах та високопродуктивних системах, хоча через вищу вартість і складність виробництва вони поки рідше використовуються в масових ігрових відеокартах. HBM пропонує дуже велику ширину шини пам'яті завдяки 3D-стекінгу чипів, що забезпечує екстремально високу пропускну здатність, але це має високу ціну та специфічні вимоги до конструкції GPU.

Економічні аспекти також впливають на розвиток відеопам'яті. Через дефіцит пам'яті високої пропускної здатності, особливо HBM для AI-акселераторів, виробники можуть нарощувати виробництво GDDR7 і змушені балансувати між витратами і доступністю технологій, що може призвести до подорожчання відеокарт у короткостроковій перспективі. Водночас GDDR6 залишається широко доступною й дешевою опцією, що також впливає на структуру ринку та асортимент моделей.

З точки зору користувачів і практичного застосування, обсяг відеопам'яті перестав бути просто маркетинговою характеристикою і став ключовим параметром для успішної роботи сучасних ігор та додатків. У 2025 році рекомендується мати щонайменше 16 GB VRAM у відеокарті для комфортного геймінгу у високих роздільних здатностях, оскільки 8 GB може містити недостатньо простору для текстур і даних на сучасних проектах.

Таким чином, за останні роки відеопам'ять еволюціонувала від GDDR6/GDDR6X до GDDR7 із суттєво вищою пропускною здатністю й енергоефективністю, що відповідає вимогам сучасних ігор, трасування променів та AI-задач. Ці зміни супроводжуються планами подальшого розвитку DRAM-технологій у найближчі роки, включно з новими поколіннями як GDDR, так і HBM, що забезпечить подальше зростання можливостей GPU у майбутньому.

За останні роки відеопам'ять GPU (VRAM) пройшла значну еволюцію, спрямовану на вирішення ключових обмежень продуктивності та вимог сучасних ігор, рендерингу й AI-задач. Традиційно відеокарти застосовували GDDR6 та GDDR6X, що забезпечували високі швидкості передачі даних - GDDR6 до ~20-24 Gbps на контакт, а GDDR6X із використанням PAM4-сигналізації до ~24 Gbps і вище, що давало пропускну здатність близько 1 ТБ/с у топових моделях. Такі стандарти були характерні для відеокарт лінійок NVIDIA RTX 30 та RTX 40, а також AMD Radeon RX 6000/7000, допомагаючи обробляти 3D-графіку на високих налаштуваннях і трасування променів.

Починаючи з кінця 2023 – початку 2024 року JEDEC затвердив стандарт GDDR7, який став наступним кроком у розвитку відеопам'яті. Цей стандарт використовує нову схему сигналізації PAM3, що дозволяє досягати до ~32 Gbps передачі даних на контакт, знижує енергоспоживання на біт та підвищує ефективність порівняно з GDDR6 і GDDR6X. За оцінками виробників пам'яті, GDDR7 може забезпечити значне збільшення пропускної здатності та ефективності енергоспоживання, що дозволяє досягти понад 1,5 Тбайт/с пропускної здатності у конфігураціях із широкими шинами пам'яті. Компанії, такі як Micron і SK Hynix, уже випускають чипи GDDR7 із початковими швидкостями ~28–32 Gbps, а також працюють над варіантами зі швидкістю до ~40 Gbps і модулями підвищеної ємності, які потенційно дозволяють збільшувати обсяг VRAM у нових GPU.

Така відеопам'ять [7] стала стандартом у новому поколінні GPU 2025 року: топові графічні процесори NVIDIA RTX 50-серії оснащуються GDDR7, що сприяє підвищенню продуктивності в іграх і робочих навантаженнях без пропорційного збільшення енергоспоживання, а також покращенню роботи трасування променів і AI-функцій. Частина мобільних версій відеокарт також використовує GDDR7 для підвищення ефективності при обмеженому тепловому пакеті. Це означає, що новий стандарт вже відображається у серійних продуктах і впливає на їхні можливості.

Паралельно з розвитком GDDR-серії, продовжує розвиватися HBM (High Bandwidth Memory) - технологія з тривимірним стекуванням мікросхем пам'яті, що дає ще більшу ширину шини й пропускну здатність, і яка застосовується насамперед у професійних прискорювачах та обчислювальних системах. Проте висока вартість і складність виробництва HBM поки обмежують її широке застосування у масових ігрових відеокартах, хоча попит на HBM у сегменті AI і HPC залишається дуже високим.

Ситуація на ринку VRAM також залежить від економічних чинників. У 2024–2025 роках спостерігалися коливання цін через перенаправлення виробничих потужностей під AI-чипи і дефіцит деяких типів DRAM-модулів, що може впливати на вартість готових графічних адаптерів та доступність нових поколінь пам'яті.

З практичної точки зору, у 2025 році обсяг відеопам'яті став одним з визначальних факторів для стабільної продуктивності в іграх і складних графічних задачах: моделі з 16 GB VRAM і більше вважаються оптимальними для сучасних AAA-ігор у високих роздільних здатностях, тоді як 8 GB часто вже буває недостатньо для повсякденних сучасних завдань.

Отже, за останні роки відеопам'ять перейшла від стандартів GDDR6/GDDR6X до GDDR7 з істотним зростанням пропускної здатності та енергоефективності, а також розширенням можливостей по обсягу. Це відповідає потребам сучасних ігор, рендерингу, трасування променів і гібридних навантажень із AI-компонентами, а також закладає основу для подальших поколінь VRAM та GPU у найближчі роки.

Висновки

За останні роки відеопам'ять графічних процесорів зазнала суттєвих змін, зокрема від стандартів GDDR6 та GDDR6X до сучасного GDDR7, що забезпечує підвищену пропускну здатність і енергоефективність. Розвиток підсистем пам'яті GPU дозволяє сучасним відеокартам ефективно працювати з великими обсягами графічних даних, трасуванням променів і ресурсомісткими обчисленнями. Використання нових архітектур пам'яті, включно з НВМ і покращеними кеш-системами, сприяє зростанню продуктивності та стабільності графічних обчислень. Таким чином, вдосконалення відеопам'яті є важливим напрямком розвитку сучасних графічних технологій і обчислювальних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Romanyuk O. N., Shenshin O. O., Bobko O. L., Titova N. V., Romanyuk S. O. GPU stream processing / O. N. Romanyuk, O. O. Shenshin, O. L. Bobko, N. V. Titova, S. O. Romanyuk // Репозитарій Вінницького національного технічного університету. - Вінниця, 2025. - 35 с.
2. Романюк О. Н., Романюк О. В., Чехмestрук Р. Ю. Комп'ютерна графіка : навч. посіб. / О. Н. Романюк, О. В. Романюк, Р. Ю. Чехмestрук. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 147 с
3. Thomas G. Modern GPU Architecture: A Comprehensive Blueprint of Graphics and AI Processing Systems. – [Незалежне технічне видання], 2025. – 580 с.
4. Deckman W. Master GPU Architecture: Developer's Practical Guide to GPU Computing. – [Незалежне технічне видання], 2024. – 126 с.
5. Salimova A., Shirinli E. GPU Memory and Hierarchy: Optimization Strategies for High Performance. – Khazar University, 2023. – 132 с.
6. Lee J., Kim H. High-Bandwidth Memory Systems for GPUs. IEEE Micro, 2021.
7. Kim Y., Lee S. Energy-Efficient GPU Memory Systems. IEEE Transactions on Computers, 2022.
8. Aila T., Laine S. Compression Techniques in Modern GPUs. Computer Graphics and Applications, 2021.
9. Sellers G., Kessenich J. Vulkan Programming Guide. Addison-Wesley, 2022.
10. Bakhoda A., Yuan G. Multi-GPU Memory Systems for Graphics and Visualization. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024.

Романюк Олександр Никифорович - д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: rom8591@gmail.com.

Майданюк Володимир Павлович - канд. техн. наук, доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: maidaniuk2000@gmail.com.

Стахов Олексій Ярославович - канд. техн. наук, старший викладач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: aleksey.stahov@gmail.com.

Romanyuk Oleksandr Nikiforovich - Dr. of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rom8591@gmail.com.

Maydanyuk Volodymyr Pavlovych - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maidaniuk2000@gmail.com.

Stakhov Oleksiy Yaroslavovych - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Software, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: aleksey.stahov@gmail.com.