

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-55-21>

УДК 621.383

Нижник Олександр Олександрович, бакалавр  
Ящинський Леонід Васильович, к.ф.-м.н., доцент  
<https://orcid.org/0000-0003-3018-3904>

Федосов Сергій Анатолійович, д.ф.-м.н., професор  
<https://orcid.org/0000-0003-3457-8911>

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

## ПРИНЦИП РОБОТИ І ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ГОЛОГРАФІЧНИХ ДИСПЛЕЇВ

**Нижник О.О., Ящинський Л.В., Федосов С.А. Принцип роботи і перспективи використання голографічних дисплеїв.** У цій роботі ми досліджуємо принцип роботи голографічних дисплеїв (моніторів), їхні технічні характеристики та потенційні переваги порівняно з традиційними дисплеями. Також розглядаються перспективи використання голографічних дисплеїв у різних галузях, включаючи медицину, освіту, розваги, телекомунікації та виробництво. Розуміння принципів функціонування цих пристроїв та їхніх потенційних можливостей може привести до нових можливостей для візуалізації даних та створення іммерсивних візуальних досвідів.

**Ключові слова:** голографічний дисплей, монітор, 3D-зображення, інтерференція.

**Nyzhnyk O., Yashchynskyy L., Fedosov S. The principle of operation and prospects for the use of holographic displays.** In this work, we investigate the principle of operation of holographic displays (monitors), their technical characteristics and effective advantages replaced by traditional displays. Prospects for the use of holographic displays in various industries, including medicine, education, entertainment, telecommunications, and manufacturing, are also considered. Understanding how these devices work and their capabilities can lead to new possibilities for data visualization and creating immersive visual experiences.

**Keywords:** holographic display, monitor, 3D image, interference.

### Постановка наукової проблеми.

У сучасному світі швидкого розвитку технологій візуальне відображення інформації стає все більш важливим і вимагає нових підходів до його забезпечення. У цьому контексті голографічні монітори (дисплеї) представляють собою перспективний напрямок, що набуває все більшого значення в галузі відтворення зображень і візуалізації даних (рис. 1). Голографічні дисплеї працюють на основі принципів голографії, яка дозволяє створювати тривимірні зображення без необхідності в спеціальних окулярах або інших пристроях.

### Аналіз досліджень.

Було запропоновано ряд технік для перегляду сцен шляхом повторного відображення попередньо відрендерених або оцифрованих зображень. Також були запропоновані методи інтерполяції між видами шляхом деформації вхідних зображень, використання інформації про глибину або відповідності між кількома зображеннями. У праці [1] описано простий і надійний метод для генерації нових видів з довільних положень камери без інформації про глибину або відповідності функцій, просто об'єднуючи та повторюючи вибірку доступних зображень. Ключ до цієї техніки полягає в інтерпретації вхідних зображень як 2D-зрізів 4D-функції – світлового поля. Ця функція повністю характеризує потік світла через безперешкодний простір у статичній сцені з фіксованим освітленням. Авторами описано вибіркоче представлення для світлових полів, яке дозволяє як ефективно створювати та відображати зовнішніх і внутрішніх виглядів. Створено світлові поля з великих масивів відтворених і оцифрованих зображень. Останні знімаються за допомогою відеокамери, встановленої на порталі, керованому комп'ютером. Після створення світлового поля можна створювати нові види в режимі реального часу шляхом виділення зрізів у відповідних напрямках. Оскільки успіх методу залежить від високої частоти дискретизації, описано систему стиснення, яка здатна стискати згенеровані світлові поля більше ніж у 100:1 із дуже невеликою втратою точності. Авторами також розглянуто проблеми згладжування під час створення та повторної дискретизації під час вилучення фрагментів.

Нещодавно було показано, що поверхні, вкриті ультратонкими плазмонними структурами – так звані метаповерхні – здатні повністю контролювати фазу світла, що представляє нову парадигму для розробки інноваційних оптичних елементів, таких як ультратонкі плоскі лінзи, спрямовані зв'язки для поверхневих плазмонних поляритонів. і генерація вихрового променя хвильової пластини. Серед різних типів метаповерхень геометричні метаповерхні, які складаються з масиву

плазмонних нанострижнів із просторово змінною орієнтацією, показали чудовий контроль фази завдяки геометричній природі їхнього фазового профілю. Метаповерхні нещодавно використовувалися для створення голограм, згенерованих комп'ютером, але ефективність голограм залишалася надто низькою у видимих довжинах хвиль для практичних цілей. Авторами [2] повідомлено про дизайн і реалізацію геометричної метаповерхневої голограми, яка досягає ефективності дифракції 80 % на 825 нм і має широку смугу від 630 нм до 1050 нм. Продемонстрована 16-рівнева фазова голограма, згенерована комп'ютером, поєднує в собі переваги геометричної метаповерхні для чудового контролю профілю фази та рефлекторних масивів для досягнення високої ефективності перетворення поляризації. Зокрема, дизайн голограми об'єднує шліфовану металеву площину з геометричною метаповерхнею, що підвищує ефективність перетворення між двома станами кругової поляризації, що забезпечує високу ефективність дифракції без ускладнення процесу виготовлення. Завдяки цим перевагам дана стратегія може бути життєздатною для різних практичних голографічних застосувань.

Метаповерхні дозволили реалізувати безліч нових функцій у надтонкому вимірі, прокладаючи шлях до плоских та високоінтегрованих фотонних пристроїв. Незважаючи на швидкий прогрес у цій галузі, одночасна реалізація реконфігурації, високої ефективності та повного контролю над фазою та амплітудою розсіяного світла становить велику проблему. У [3] автори намагалися розв'язати цю задачу, представивши концепцію перепрограмованої голограми на основі 1-бітових метаповерхень кодування. Стан кожної елементарної комірки кодуєвої метаповерхні можна перемикає між «1» і «0» шляхом електричного керування навантаженими діодами. Експерименти з підтвердження концепції показують, що кілька бажаних голографічних зображень можна реалізувати в режимі реального часу лише за допомогою однієї метаповерхні кодування. Запропонована перепрограмована голограма може стати ключем до створення майбутніх інтелектуальних пристроїв із реконфігурованими та програмованими функціями, які можуть призвести до прогресу в різноманітних додатках, таких як мікроскопія, дисплей, безпека, зберігання даних та обробка інформації.

Методи цифрової голографії удосконалюються для отримання високоякісних зображень кількісної фазово-контрастної мікроскопії. Зокрема, видно, що метод кутового спектру розрахунку голографічного оптичного поля має значні переваги, включаючи жорсткий контроль паразитних шумових компонентів. Голографічні фазові зображення отримують із боковою роздільною здатністю 0,5 мкм, обмеженою дифракцією, і значною мірою захищені від когерентного шуму, звичайного в інших голографічних методах. Фазовий профіль має точність приблизно до 30 нм оптичної товщини [4].

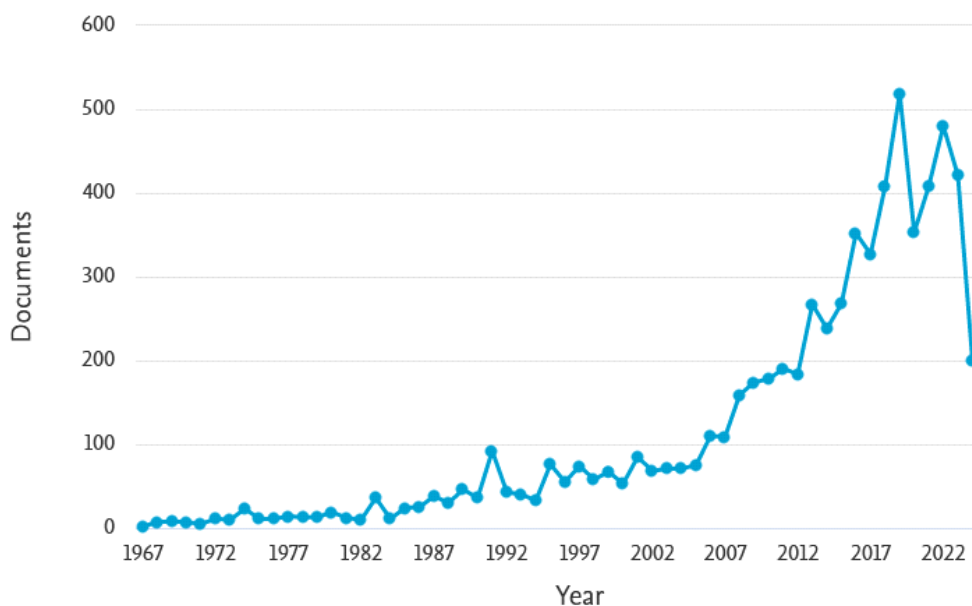


Рис. 1 – Кількість публікацій за роками, пов'язаних з голографічними дисплеями

Рідкокристалічні лазери – це розвиваюча область у галузі фотоніки м'якої матерії, яка може стати провісником нової ери ультратонких, надзвичайно універсальних лазерних джерел. Такі

лазери мають безліч чудових особливостей, включаючи широкосмугову перестроюваність, велику площу когерентності та, у деяких випадках, багатоспрямоване випромінювання. Вони мають потенціал для поєднання великої вихідної потужності з мініатюрними розмірами порожнини – дві властивості, які традиційно були несумісними. Їх потенційні можливості застосування різноманітні, починаючи від мініатюрних медичних діагностичних інструментів і закінчуючи голографічними лазерними дисплеями великої площі. У роботі [5] обговорено наукові витoki цієї технології та дано короткий огляд передових досліджень, які зараз проводяться в усьому світі.

**Постановка завдань.** Метою дослідження є вивчення основних принципів роботи голографічних моніторів, їхні технічні характеристики і переваги над традиційними дисплеями. Розглянути перспективи використання голографічних моніторів у різних галузях, включаючи медицину, освіту, розваги, телекомунікації та виробництво.

**Викладення основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.**

**Загальні відомості.** Голографічний дисплей – це тип дисплея, в якому для створення віртуального тривимірного зображення використовується дифракція світла. Голографічні екрани відрізняються від інших способів отримання 3D-зображень тим, що вони не потребують будь-яких спеціальних окулярів або зовнішнього обладнання для перегляду зображення.

Голографія – набір технологій для точного запису, відтворення і переформатування хвильових полів. Це спосіб одержання об'ємних зображень предметів на фотопластинці (голограми) за допомогою когерентного випромінювання лазера. Голограма фіксує не саме зображення предмета, а структуру відбитої від нього світлової хвилі (її амплітуду та фазу). Для отримання голограми необхідно, щоб на фотографічну пластинку одночасно потрапили два когерентних світлових пучки: предметний, відбитий від об'єкта та опорний, що проходить безпосередньо від лазера. Світло обох пучків інтерферує, створюючи на пластинці чергування дуже вузьких темних і світлих смуг – інтерференційну картину.

Голографічні монітори мають ряд переваг перед традиційними дисплеями. Вони більш реалістичні, інтерактивні та можуть відображати більше інформації. Завдяки цьому вони мають потенціал революціонізувати спосіб, яким ми взаємодіємо з комп'ютерами та інформацією.

**Принцип роботи.** Розглянемо принцип роботи голографічного монітора. Голографічні дисплеї на основі інтерференції:

цей тип дисплея використовує два пучки світла: опорний пучок і предметний пучок;

опорний пучок – це еталонний пучок світла, який не змінюється;

предметний пучок – це пучок світла, який містить інформацію про зображення, яке потрібно створити;

при перетині цих двох пучків світла утворюється інтерференційна картина;

ця інтерференційна картина потім перетворюється на тривимірне зображення спеціальним матеріалом.

Для того щоб побачити голографічне зображення необхідно його записати та в подальшому реконструювати з запису. Процес запису зображення зображено на рисунку 2.

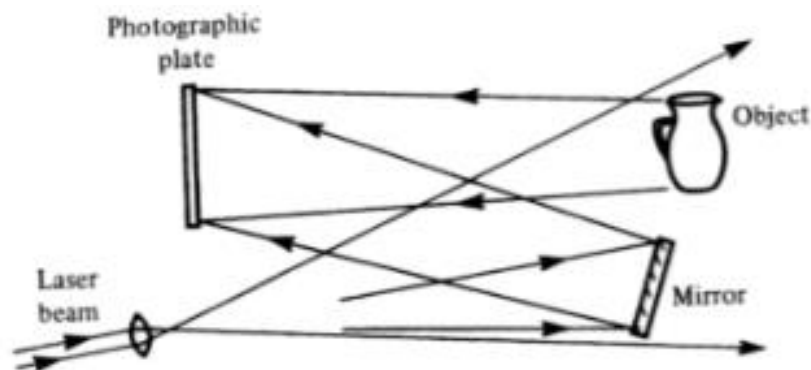


Рис. 2 – Запис голограми

На рисунку 2 фотопластинка записує інтерференційну картину, створювану світловими хвилями, розсіяними від об'єкта, і опорною хвилею, відбитою від нього дзеркалом.

Після того, як голограму було записано, її необхідно відтворити, цей процес представлено на рисунку 3.

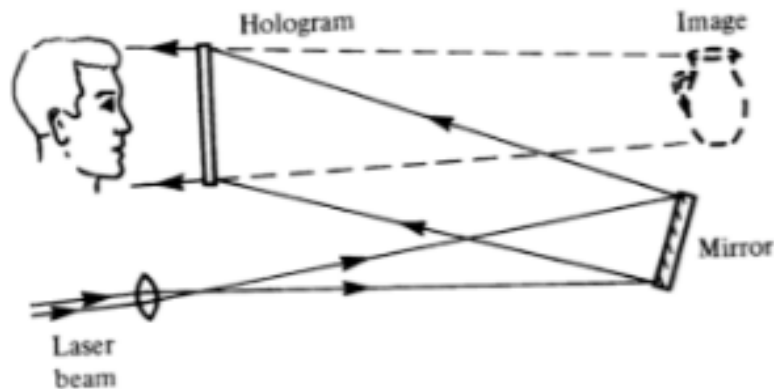


Рис. 3 – Реконструкція зображення

На рисунку 4 представлена інша схема, яка демонструє принцип роботи голографічного монітора.

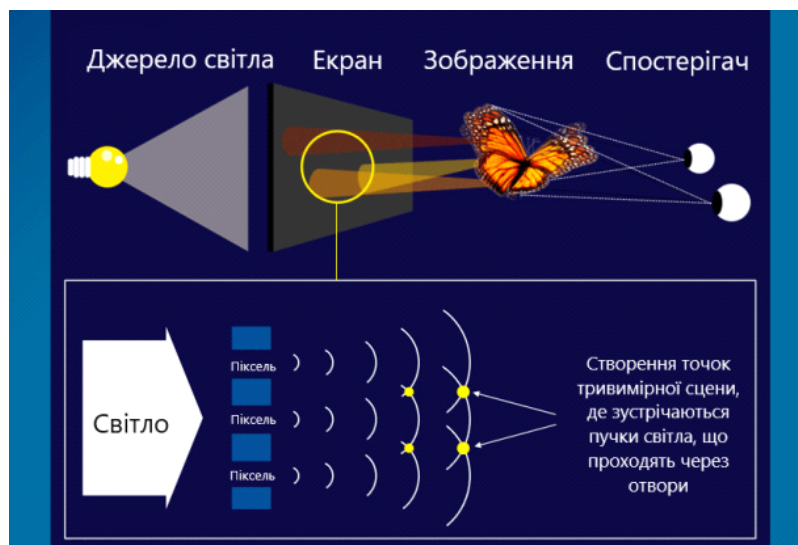


Рис. 4 – Принцип роботи голографічного монітора

Голографія використовує лазерні джерела світла для реконструкції тривимірних зображень. Світло від лазерів зустрічається, щоб створити точку, і безліч таких точок об'єднується, щоб утворити загальну 3D-сцену.

Лазер із когерентним світлом використовується як джерело підсвічування, тоді як пікселі панелі дисплея калібруються і контролюються, щоб світло зустрічалось в певній точці простору для створення точок тривимірної сцени на основі принципу конструктивної інтерференції.

У загальному можна виокремити 3 основні фізичні принципи які використовуються в роботі голографічних моніторів:

інтерференція – це явище, при якому два хвилі світла складаються, щоб створити нову хвилю;

дифракція – це явище, при якому хвиля світла розсіюється, коли вона зустрічає перешкоду;

голографія – це процес запису та відтворення тривимірних зображень.

**Перспективи використання.** Голографічні монітори пропонують ряд перспективних переваг порівняно з традиційними дисплеями, що робить їх потенційно революційними в багатьох сферах. Розглянемо основні переваги:

1. Реалістичність. Голографічні зображення значно реалістичніші, ніж зображення на традиційних дисплеях. Їх тривимірність створює відчуття глибини та об'єму, що робить їх більш захоплюючими та інформативними.

2. Інтерактивність. Голографічні монітори можуть бути інтерактивними, що дозволяє користувачам взаємодіяти з зображеннями та маніпулювати ними. Це може бути корисно для таких завдань, як віртуальне навчання, хірургія та ігри.

3. Відображення інформації. Голографічні монітори можуть відображати значно більше інформації, ніж традиційні дисплеї. Це пов'язано з тим, що вони можуть проєктувати зображення в трьох вимірах, а не лише на двовимірній поверхні.

4. Нові можливості. Голографічні монітори відкривають нові можливості для спілкування, розваг та освіти. Вони можуть використовуватися для створення віртуальних середовищ, які неможливо відтворити за допомогою традиційних дисплеїв.

Враховуючи основні переваги голографічних моніторів можна виокремити декілька основних сфер їх використання.

**Освіта.** Голографічні монітори можуть використовуватися для створення більш захоплюючого та інтерактивного досвіду навчання. Вони можуть дозволити учням візуалізувати складні концепції та взаємодіяти з ними, що може призвести до кращого засвоєння матеріалу.

**Медицина.** Голографічні монітори можуть використовуватися для візуалізації анатомії та проведення хірургічних операцій. Це може допомогти хірургам краще планувати та виконувати операції, що може призвести до кращих результатів для пацієнтів.

**Розваги.** Голографічні монітори можуть використовуватися для створення більш реалістичного досвіду ігор і фільмів. Вони також можуть використовуватися для створення віртуальних концертів та інших заходів.

**Реклама.** Голографічні монітори можуть використовуватися для створення більш привабливих рекламних дисплеїв. Вони можуть дозволити рекламодавцям розповідати історії та демонструвати продукти більш захоплюючим способом.

**Висновки та перспективи подальшого дослідження.** Голографічні монітори є перспективним напрямком в сучасних технологіях візуалізації і відображення інформації. Їхній принцип роботи базується на використанні світлової інтерференції та дифракції для створення тривимірних зображень без необхідності у спеціальних окулярах чи гарнітурах. Основні фізичні властивості, такі як дифракція світла й інтерференція, лежать в основі їхньої роботи.

Перспективи використання голографічних моніторів дуже широкі. Вони можуть знайти застосування в медицині для відображення тривимірних моделей органів і тканин, у навчанні для візуалізації складних концепцій, у розважальній індустрії для створення іммерсивних віртуальних середовищ, у телекомунікаціях для покращення спілкування та багато іншого.

Голографічні монітори можуть змінити спосіб, яким ми сприймаємо і взаємодіємо з інформацією, роблячи візуалізацію більш іммерсивною, ефективною та інтерактивною. Хоча вони ще не стали повсякденними в нашому житті, їхні потенційні можливості надають підстави для оптимізму щодо майбутнього розвитку цієї технології.

#### Список бібліографічного опису

1. Левоу, М., Ханрахан, П. (1996). Візуалізація світлового поля. *Матеріали 23-ї щорічної конференції з комп'ютерної графіки та інтерактивних технологій, SIGGRAPH 1996*, 31–42. DOI: [10.1145/237170.237199](https://doi.org/10.1145/237170.237199)
2. Чжен, Г., Мюленбернд, Х., Кенні, М., Зентграф, Т., Чжан, С. (2015). Метаповерхневі голограми досягають 80% ефективності. *Природні нанотехнології*, 10(4), 308–312. DOI: [10.1038/nnano.2015.2](https://doi.org/10.1038/nnano.2015.2)
3. Лі, Л., Джун Цуй, Т., Джі, В.,...Кю, К.-В., Чжан, С. (2017). Електромагнітні перепрограмовані голограми кодування метаповерхні. *Комунікації природи*, 8(1), 197. DOI: [10.1038/s41467-017-00164-9](https://doi.org/10.1038/s41467-017-00164-9)
4. Манн, К.Дж., Ю, Л., Ло, Ч.-М., Кім, М.К. (2005). Кількісна фазово-контрастна мікроскопія високої роздільної здатності методом цифрової голографії. *Оптика Експрес*, 13(22), 8693–8698. DOI: [10.1364/opex.13.008693](https://doi.org/10.1364/opex.13.008693)
5. Коулз, Х., Морріс, С. (2010). Рідкокристалічні лазери. *Фотоніка природи*, 4(10), 676–685. DOI: [10.1038/nphoton.2010.184](https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.184)

#### References

1. Levoy, M., Hanrahan, P. (1996). Light field rendering. *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1996*, 31–42. DOI: [10.1145/237170.237199](https://doi.org/10.1145/237170.237199)
2. Zheng, G., Mühlenbernd, H., Kenney, M.,...Zentgraf, T., Zhang, S. (2015). Metasurface holograms reaching 80% efficiency. *Nature Nanotechnology*, 10(4), 308–312. DOI: [10.1038/nnano.2015.2](https://doi.org/10.1038/nnano.2015.2)
3. Li, L., Jun Cui, T., Ji, W., ...Qiu, C.-W., Zhang, S. (2017). Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms. *Nature Communications*, 8(1), 197. DOI: [10.1038/s41467-017-00164-9](https://doi.org/10.1038/s41467-017-00164-9)
4. Mann, C.J., Yu, L., Lo, C.-M., Kim, M.K. (2005). High-resolution quantitative phase-contrast microscopy by digital holography. *Optics Express*, 13(22), 8693–8698. DOI: [10.1364/opex.13.008693](https://doi.org/10.1364/opex.13.008693)
5. Coles, H., Morris, S. (2010). Liquid-crystal lasers. *Nature Photonics*, 4(10), 676–685. DOI: [10.1038/nphoton.2010.184](https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.184)