

В. В. Петров, А. А. Крючин, Є. В. Беляк, О. Г. Мельник
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113, Київ, Україна
e-mail: kryuchyn@gmail.com

Перспективи оптичної пам'яті

Представлено результати аналізу методів збільшення ємності оптичних носіїв, у першу чергу, для систем архівного зберігання даних, визначено можливості застосування в перспективних типах оптичних носіїв нанокмпозитних матеріалів. Показано, що головним напрямком створення оптичних носіїв з надцильним записом в останні роки стало використання плазмонних резонансів у металевих наноструктурах і реалізація технології ближньопольового запису. Суттєве збільшення щільності запису може забезпечити використання штучної нейронної мережі при відтворенні даних з оптичного носія з нанорозмірними інформаційними елементами.

Ключові слова: оптичні носії, наноструктури, плаزمони, ближнє поле, нейроні мережі.

Вступ

Оптичні носії тривалий час були та залишаються надійним варіантом для архівного зберігання інформації. Єдиною проблемою для їхнього широкого використання є обмежена можливість задовольнити вимоги до зберігання постійно зростаючих обсягів даних, які сьогодні не можуть бути реалізовані в повному обсязі. Якщо технології оптичного запису зможуть забезпечити хоча би десятки терабайт (ТБ) ємності на стандартному диску, то оптичний запис може розглядатись як перспективне рішення для архівного зберігання даних [1]. Головним недоліком сучасних систем оптичного запису є невисока щільність запису, яка призводить до високої вартості зберігання даних на оптичних носіях. Вартість зберігання даних на магнітних дисках становить менше 25 доларів за ТБ, на стрічкових — менше 10 доларів за ТБ, у той час як оптичні технології коштують трохи нижче 50 доларів за ТБ. Щоб забезпечити більш широке використання, вартість оптичних носіїв повинна скоротитися в п'ять-десять разів з розрахунку на ТБ. Це може бути досягнуто за рахунок збільшення ємності оптичних носіїв при одночасному зниженні виробничих витрат [2]. Для довгострокового зберігання даних (майже вічного) оптичні носії мають значні переваги над іншими типами носіїв. Розмір цього конкрет-

ного сегмента ринку невеликий порівняно із загальним ринком архівних сховищ [2]. Для організації довгострокового зберігання даних повинні створюватися спеціальні типи оптичних носіїв [3–5]. Головна проблема обмеженої ємності оптичних носіїв інформації полягає у неможливості зменшити за дифракційну межу діаметр лазерного променя, яким здійснюються запис і зчитування інформації. Завдання подолання оптичної дифракційної межі та збільшення роздільної здатності оптичних системи реєстрації, і тим самим зростання ємності оптичних носіїв, є ключовим завданням для інтеграції технології оптичного зберігання даних з тенденціями розвитку інформаційних технологій, такими як зберігання і обробка великих обсягів даних і хмарне зберігання даних. До цього часу не використано можливості створення тривимірної (3D) оптичної технології зберігання даних [6–8]. Для створення багатошарових дисків пропонувалося використання для запису інформації двофотонного поглинання світла (2P), на основі якого можливе створення тривимірної (3D) оптичної системи зберігання даних. На відміну від однофотонного процесу запису двофотонне поглинання (2P) відбувається за умови поглинання двох фотонів одночасно. Оскільки поглинання 2P залежить від квадрату інтенсивності падаючого пучка світла, зона запису може бути обмежена невеликою областю у фокусі об'єктива. Іншими словами, 2P-збудження має більш високу просторову роздільну здатність порівняно з однофотонним процесом реєстрації, що дозволяє чітко записувати та відтворювати інформаційні одиниці без небажаних перехресних завад від сусідніх інформаційних шарів. За останнє десятиліття техніка 2P-процесу запису була продемонстрована в різноманітних матеріалах і показана можливість створення оптичної пам'яті з високою щільністю запису. Найвища щільність 3D-запису даних при 2P-процесі запису лазерним променем з довжиною хвилі 800 нм становить приблизно десятки Тбіт/см³ [9].

Про те, що можливості оптичних носіїв зі зберігання великих обсягів інформації далеко не вичерпані, свідчать останні розробки оптичних носіїв, які базуються на використанні нанокомпозитних матеріалів і близькопольового методу запису [7, 10–12]. Повідомлялося про можливості створення оптичних дисків стандартних розмірів з ємністю до 700 ТБ [6]. Спеціальна увага приділяється створенню оптичних носіїв для довгострокового зберігання великих обсягів даних [3, 13]. Найбільш вражаючих результатів у створенні таких носіїв досягла компанія Microsoft, яка в рамках проекту Project Silica довела можливість тривалого зберігання даних в об'ємі кварцового скла. Запис здійснюється променем лазера шляхом деформації ґратки кремнію зі створенням шарів тривимірних «записів» у товщі скла. Для відтворення записаної у склі інформації використовується алгоритм машинного навчання, який декодує неоднорідності, що створені променями поляризованого світла [13].

Шляхи збільшення ємності 2D-оптичних носіїв інформації

Головним напрямком створення оптичних носіїв з надщільним записом в останні роки стало використання плазмонних резонансів у металевих наноструктурах для реалізації технології ближньопольового запису [14–17]. Набула популярності концепція оптичного запису даних із використанням плазмонних резонансів різноманітних металевих наноструктур. Оскільки частота плазмонного резонансу є дуже чутливою до багатьох параметрів, таких як форма і матеріал нано-

структури, електромагнітні властивості оточуючого середовища, розміщення наноструктур відносно одна одної, довжина хвилі та напрямок поляризації збуджуючого випромінювання тощо — це надає широкі можливості щодо кодування, щільного запису та зчитування інформації. Ефективним напрямком досліджень зі збільшення ємності оптичних носіїв може стати використання спектральної сигнатури металевих наноструктур [15, 16, 18, 19]. Цей метод базується на тому, що для металевих наноструктур притаманні сильні зміни у спектрах відбивання і/або пропускання внаслідок збудження поверхневого плазмонного резонансу (SPP). Резонансні моди SPP таких наноструктур, що призводять до унікальних особливостей у спектрах оптичного відбиття/пропускання, визначаються характеристиками використаних матеріалів, а також геометрією та розмірами наноструктурних об'єктів. Резонанси металевих наноструктур залежать від стану поляризації падаючого світла, а також від взаємодії з навколишнім середовищем [15, 16, 20].

Для реалізації системи оптичного надщільного запису запропоновано схему запису, в якій лазерний імпульс тривалістю кілька фемтосекунд фокусується на субмікронну ділянку оптичного диска, яка містить плазмонні наноструктури. Кожна така плазмонна структура, яку називають бітовою коміркою, являє собою сукупність нанорозмірних отворів та/або щілин у тонкій металевій плівці. (Альтернативною плазмонною наноструктурою може бути скупчення металевих наночастинок або нанострижнів, включених до прозорого матеріалу). Кожна бітова комірка містить декілька (наприклад, десятків і більше) біт даних користувача. Розміри бітових комірок визначаються об'ємом матеріалу, який опромінюється сфокусованим лазерним променем. Інформація, що зберігається у кожній бітовій комірці, модулює спектр падаючого оптичного випромінювання, який визначається за допомогою оптичного аналізатора спектра. На рис. 1 показана можлива реалізація оптичного реєструвального середовища, що включає в себе наноотвори та/або нанорозрізи в тонкій металевій плівці. Біти даних згруповані в невеликі кластери та розміщені всередині окремих бітових комірок, кожна комірка містить кілька бітів інформації. Наприклад, типова бітова комірка може мати розміри $0,5 \times 5,0$ мкм на поверхні плівки срібла товщиною $0,2$ мкм, кожна бітова клітина містить десять і більше нанодірок, окремі діаметри яких можуть становити 20 – 100 нм. Якщо в даному кластері присутність або відсутність нанодірки певного розміру пов'язана з одним інформаційним бітом («0» або «1»), то m -наноотвори можуть кодувати m -бітову послідовність у кожній бітовій комірці. (На рис. 1 показана одна доріжка, що містить наноотвори, і сусідня доріжка, що містить нанорозрізи, априорної причини для їхнього розрізнення не існує; іншими словами, повинна бути можливість змішати нанорозрізи з круглими також як еліптичні нанодірки у довільних комбінаціях і композиціях) [15].

Коефіцієнт пропускання світла через наноотвір (або нанощілину) залежить від діаметра отвору та товщини плівки, а також розміру, форми та місця розташування сусідніх наноотворів. Для визначеного стану поляризації падаючого променя пропускання через наноапертуру сильно залежить від довжини хвилі (рис. 2). Саме ця властивість наноотворів і нанощілин забезпечує механізм зчитування записаної інформації.

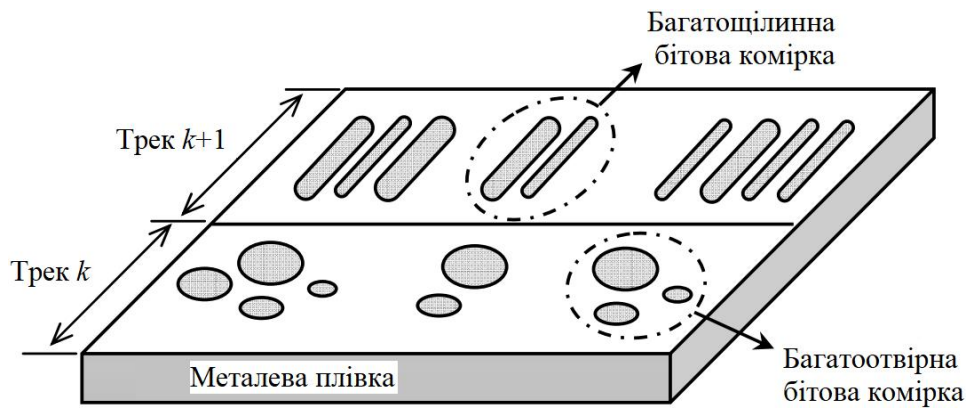


Рис. 1. Реалізація концепції плазмонних ознак у вигляді наноотворів та/або наношліл у тонкій металевій плівці. Група таких ознак становить бітову комірку, всередині якої декілька бітів інформації кодуються в невеликій (порядку мікрона) області носія інформації. Подібно до організації даних на звичайному оптичному диску, ці бітові комірки розташовані послідовно уздовж паралельних треків даних [15]

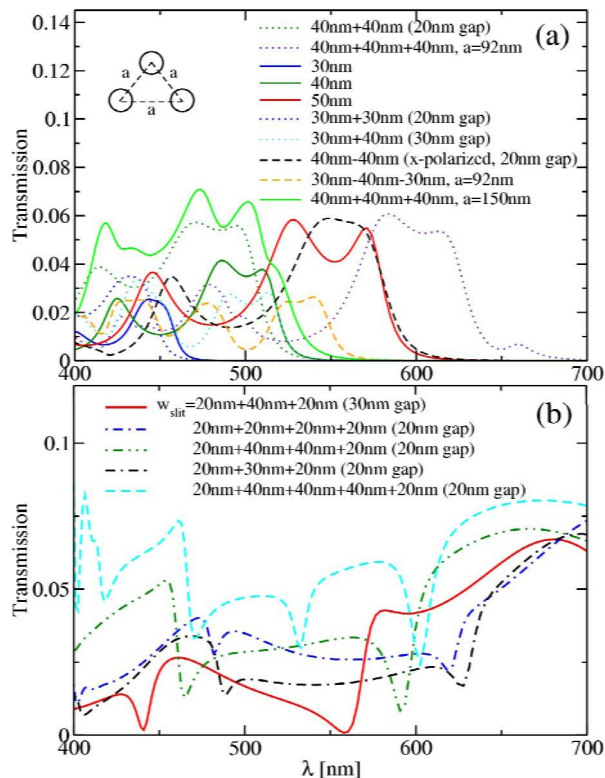


Рис. 2. Розраховане пропускання залежно від довжини хвилі для: а) наноотворів; б) наношліл у срібній плівці [15]

Срібна плівка товщиною 250 нм (рис. 2,а) містить одинарні, подвійні та потрійні циліндричні отвори різного діаметра. Усі отвори заповнені прозорим діелектриком з показником заломлення $n_0 = 2,0$. Сфокусований промінь має Гаусів розподіл інтенсивності з діаметром на півширині 1 мкм, він є лінійно поляризованим уздовж осі y . Перетяжка сфокусованої плями знаходиться в площині xz на відстані $Az = 55$ нм над верхньою поверхнею срібної плівки. Спектральні варіації пропус-

кання обумовлені резонансами всередині кожного отвору, а також плазмонною взаємодією між сусідніми отворами.

На рис. 2,*b* показано кілька заповнених повітрям щілин ($n_0 = 1$), що мають ширину $W_1 = 20$ нм, $W_2 = 30$ нм і $W_3 = 40$ нм. Різні комбінації цих прорізів розміщені у срібній плівці товщиною 400 нм і опромінюються сфокусованим променем з Гаусовим розподілом інтенсивності. Кожен кластер нанощілин має унікальний спектр пропускання, який може бути використаний для ідентифікації кластера під час зчитування.

З рис. 2 можна побачити, що пропускання сильно залежить від параметрів наноструктури носія, що і надає змогу зберігання даних у ньому. Швидкість зчитування даних з такого носія може складати приблизно 2 Гбіт/с [15].

Комп'ютерне моделювання показує, що спектри пропускання кластерів наноотворів і/або нанощілин у тонких металевих плівках мають множинні резонансні піки, які можна використовувати для ідентифікації записаної структури під час зчитування. На рис. 2,*a* показаний ряд спектрів пропускання, обчислених методом FDTD для срібної плівки товщиною 250 нм, розміщеної у вільному просторі. На рис. 1 зображено поодинокі, подвійні та потрійні наноотвори, які розміщені на різних відстанях, усі заповнені діелектриком з показником заломлення $n_0 = 2,0$. Довжини хвиль охоплюють видимий діапазон 400–700 нм, хоча, в принципі, діапазон може бути розширений і до ультрафіолетових, і до інфрачервоних довжин хвиль. Подібні криві пропускання для декількох заповнених повітрям (тобто $n_0 = 1,0$) нанощілин у підвищеній срібній плівці товщиною 400 нм показано на рис. 2,*b*. Схему зчитування з плазмонного диска, зображеного на рис. 1, наведено на рис. 3.

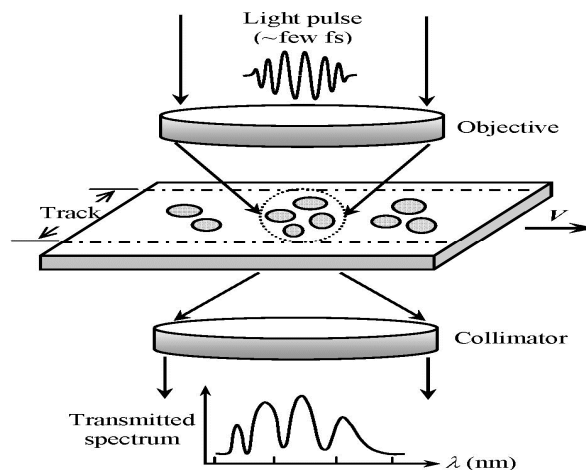


Рис. 3. Запропонована схема зчитування з плазмонного диска, зображеного на рис. 1 [15]

Процес зчитування відбувається таким чином: фемтосекундний лазерний імпульс фокусується дифракційно обмеженим об'єктом на поверхню диска. Лазерний імпульс має широкий спектр, охоплюючи весь видимий діапазон (400–700 нм) і, можливо, поза його межами. Розмір сфокусованої плями на поверхні диска становить приблизно 0,5 мкм і за розмірами порівнянний з розмірами бітових комірок. Хоча нанодірки всередині даної клітини не розрізняються індивідуа-

льно у звичайному розумінні, їхнє колективне зображення, яке представлено на спектрі пропускання світла, може бути використане для ідентифікації наявності чи відсутності різних дірок у комірці. Наприклад, для 10 наноотворів, розміщених у кожній комірці, загальна кількість різних спектральних візерунків становитиме $2^{10} = 1024$. Спектральні візерунки можна додатково оптимізувати, регулюючи форму, розмір і положення наноотворів стосовно один до одного, а також орієнтацію відносно напрямку поляризації падаючого променя.

Для зберігання інформації з використанням запропонованого способу необхідно виготовити зразок носія з нанорозмірними отворами, якими закодована необхідна інформація. На рис. 4 показано структуру зразка з нанорозмірними отворами в срібній плівці, на якому проводились експерименти з відтворення інформації.

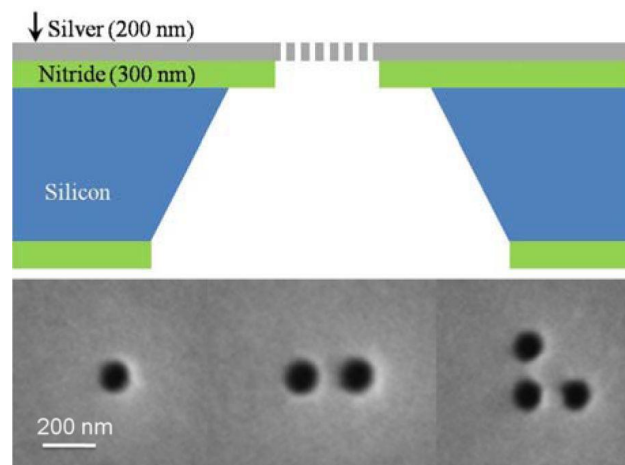


Рис. 4. Поперечний переріз зразка носія та зображення наноотворів діаметром приблизно 100 нм, протравлених сфокусованим іонним пучком у плівці срібла товщиною 200 нм, що розміщена на мембрані з кремнію, яка покрита шаром нітриду кремнію товщиною 300 нм. Кремнієва підкладка та шар нітриду кремнію протравлені далеко від області розміщення наноотворів (показано одинарні, подвійні та потрійні наноотвори) [15]

Оптичний плазмонний спосіб зберігання даних передбачає довготермінове зберігання інформації, записаної у вигляді малюнку з наноотворів, нанострижнів або наночастинок довільної форми, створених у металевих плівках. В оптичному плазмонному способі зберігання даних використання дуже коротких світлових імпульсів (приблизно кілька фемтосекунд) є надзвичайно важливим, оскільки аналіз сигналів з носія інформації проводиться у широкому оптичному спектральному діапазоні для паралельного зчитування всієї інформації, що зберігається в бітовій комірці [15].

Для подолання обмеження, що пов'язано з високим рівнем завад при відтворенні інформації, записаної на носіях з надщільним записом, було запропоновано використання нейронних мереж для розпізнавання візуальних образів. Останнім часом нейронні мережі широко використовуються для розпізнавання візуальних образів [21, 22]. На рис. 5 наведено схему процесу використанням нейронних мереж для обробки оптичних зображень, отриманих з оптичного мікроскопа у різних режимах роботи [22].

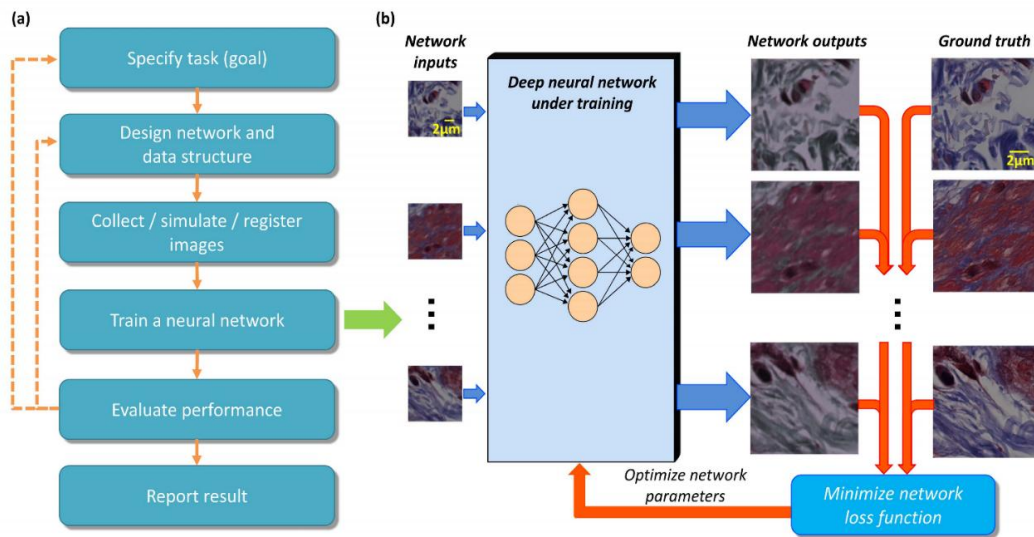


Рис. 5. Оптична мікроскопія на основі апарату неймереж: а) типові процеси виконання реконструкції зображення з оптичного мікроскопу та покращення якості зображення з використанням нейронної мережі; б) типовий інформаційний потік у неймережі в процесі обробки мікроскопічного зображення надвисокої роздільної здатності [22]

Дослідження з використання штучної нейронної мережі при створенні оптичного носія з надщільним записом інформації проводилися на спеціально створеному носії, в якому були використані наноструктури кремнію і оригінальна схема цифрового кодування інформації, що передбачала виділення в області, розміри якої визначалися дифракційно обмеженою роздільною здатністю фокусувальної системи, нанорозмірних структур. Завдяки високому показнику заломлення з низькою уявною частиною в наноструктурах з кремнію збуджуються оптичні резонанси з низькими втратами у всьому видимому спектральному діапазоні. Крім того, кремній має великі технологічні переваги при створенні наноструктур, перш за все, за рахунок створеної технології виготовлення CMOS-структур, які мають низьку вартість і довговічність. Для надійного пошуку записаної інформації був запропонований метод на основі машинного навчання (ML), в якому спектри розсіювання аналізуються штучною нейронною мережею (ANN). ANN — це обчислювальні структури, що можуть бути «навчені» для ефективного вирішення завдань, які важко розв'язуються класичною комп'ютерною арифметикою. ANN використовуються в багатьох програмах з розпізнавання зображень та інтерпретації медичних зображень. Окрім кількох репрезентативних прикладів, машинне навчання майже не застосовується для вирішення проблем у нанооптиці. Відомо, що надійне зчитування даних з голографічної пам'яті було реалізоване за допомогою згорткових ANN [20].

Основний принцип запропонованої системи запису проілюстровано за допомогою чотирибітного масиву з чотирма блоками всередині квадрата (рис. 6). Кожен блок розміром 120×120 нм може бути порожнім або заповненим наночастинкою кремнію товщиною 90 нм. Наночастинки кремнію можуть підтримувати оптичні резонансні режими у видимому діапазоні частот завдяки високому показнику заломлення. Порожні блоки можна розглядати як «нулі», а заповнені блоки

— як «одиниці», що забезпечує загальну ємність квадрата чотирьох біт (або «напівбайта») з 16 можливими конфігураціями. Щоб розрізнити дві різні поляризації, дослідники також ввели границю *L*-подібної форми 60 нм ширини, зроблену з кремнію. Такі шаблони можна розглядати як QR-коди для певного фрагмента інформації. Крім того, завдяки технологічним можливостям сучасних нанотехнологій конструкції можуть бути виготовлені з високою точністю. У процесі зчитування інформації спектри мікроскопічних зображень, отримані в темному полі для двох поляризацій, збираються та направляються до штучної нейронної мережі для здійснення надійного зчитування. На основі аналізу зразків спектрів було встановлено, що для швидкого та точного зчитування не потрібні повні спектри, і можна точно отримати інформацію зі зменшених спектрів на вибраних довжинах хвиль, таких як червона (R), зелена (G) та синя лінії (B). Це дає можливість паралельного зчитування за допомогою кольорів RGB безпосередньо із зображень мікроскопу.

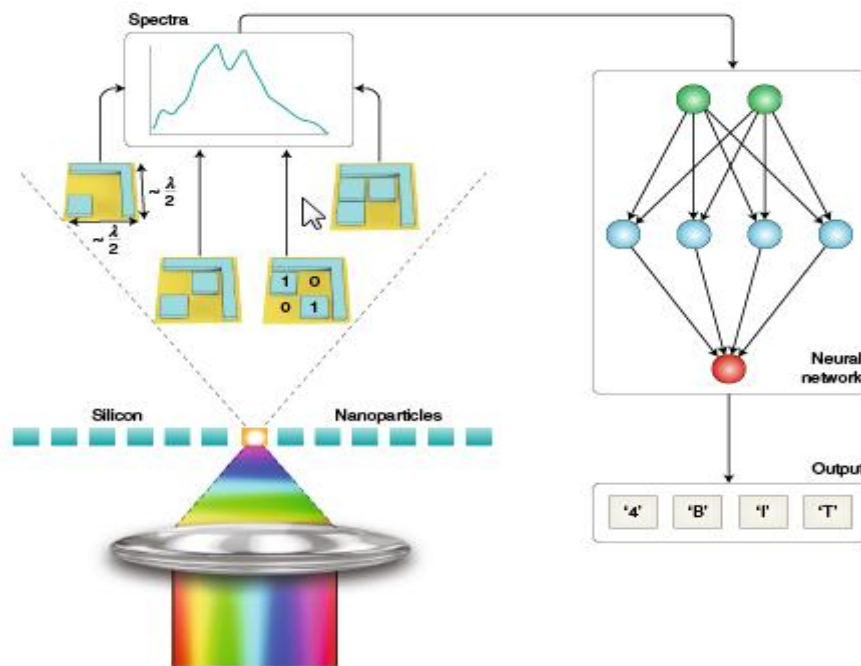


Рис. 6. Багаторозрядне кодування та зчитування інформації дифракційно обмеженими оптичними системами з використанням глибокого навчання

На рис. 6 показано зону запису, розміри якої визначаються дифракційними обмеженнями, вона поділяється на більш дрібні блоки, що утворюють масив, і кожен блок у масиві заповнений або не заповнений наночастиною кремнію, що представляє собою 1 або 0 одиницю інформації. Наприклад, у випадку чотирибітного масиву існує 16 можливих конфігурацій, які були зібрані за допомогою темнопольного мікроскопа в оптичні спектри різних конфігурацій, і вони оброблялися штучною нейронною мережею. Деякі зміни можуть давати схожі відповіді для різних поляризацій. Деякі конфігурації можуть давати подібні спектри для різних поляризацій. Щоб їх однозначно розрізнити за допомогою поляризаційної оптичної спектроскопії, було введено *L*-подібну границю. Методика не обмежує-

ться чотирибітними масивами, а також була продемонстрована для дев'ятибітних масивів [21].

Розроблена система має деякі обмеження. Блоки менших розмірів можуть давати подібні спектри в далекому полі для різних структур через відсутність сильної резонансної реакції, що призводить до помилки в пошуку інформації. Крім того, через збільшення поглинання випромінювання, випромінювання з більш короткими довжинами хвиль не можуть використовуватися для кодування інформації. Ці обмеження можуть бути подолані при використанні інших напівпровідникових матеріалів з більш високим показником заломлення та меншими дисипативними втратами, такими як AlAs або GaP [20, 21].

Запропонований підхід прокладає шлях до точного та масового паралельного зчитування інформації з 2D-оптичного носія з високою щільністю запису за допомогою далекопольових оптичних систем у поєднанні з концепціями машинного навчання. Такий підхід може бути легко узагальнений до інших завдань класифікації у нанооптиці, включаючи застосування в плазмоніці або при виявленні біологічних зразків [20]. Збільшення ємності оптичних дисків призводить до зменшення зазору між фокусувальним об'єктивом та диском і допуску на помилку фокусування. У разі надзвичайно малої відстані різні зовнішні перешкоди з великою ймовірністю можуть призвести до зіткнення фокусувального об'єктива та диска. Щоб уникнути зіткнення і ефективно усунути збудження, пропонується використання спеціального контролера для забезпечення роботи системи автофокусування [23].

Наноматеріали для систем оптичного запису

Наноматеріали, що мають унікальні механічні, електронні та оптичні властивості дають змогу розробляти методи оптичного зберігання даних з надвисокою ємністю, тривалим строком зберігання даних та ультранизьким споживанням енергії. У наступних поколіннях оптичних систем зберігання даних будуть використовуватися металеві наночастинки, графен та оксид графену, напівпровідникові квантові точки та нанокристали, леговані рідкоземельними елементами [12].

Для систем надщільного запису запропоновано метод створення фоточутливих матеріалів, який базується на резонансній передачі енергії від наночастинок лантаноїдів до оксиду графену для оптичного запису нанорозмірних елементів. У процесі запису відбувається локальне хімічне відновлення лусочок оксиду графену з поперечним розміром елементів приблизно 50 нм ($1/20$ довжини хвилі) з інтенсивністю опромінення $11,25 \text{ мВт/см}^2$. Резонансна передача енергії може зробити можливим створення систем оптичного зберігання даних нового покоління з високою ємністю і низьким енергоспоживанням [10]. Принцип пропонованого методу запису показаний на рис. 7.

Дослідження в галузі створення систем оптичної пам'яті спрямовані також на забезпечення додаткових рівнів безпеки при зберіганні великих інформаційних масивів. Прикладом такого носія може бути новий оптичний носій інформації на основі прозорої склокераміки (TGC) з фотолюмінісцентними нанокристалами $\text{LiGa}_5\text{O}_8: \text{Mn}^{2+}$, на якому можливий запис і відтворення даних у режимі захоплення/випромінювання фотонів. Високовпорядкована наноструктура матеріалу забезпечує запис з високою роздільною здатністю та низьким рівнем помилок. Крім

того, висока прозорість розробленого об'ємного реєструвального середовища робить можливим 3D-оптичне зберігання даних і збільшення рівня інформаційної безпеки за рахунок мультиплексування сигналів, відтворення за інтенсивністю та довжиною хвилі [23].

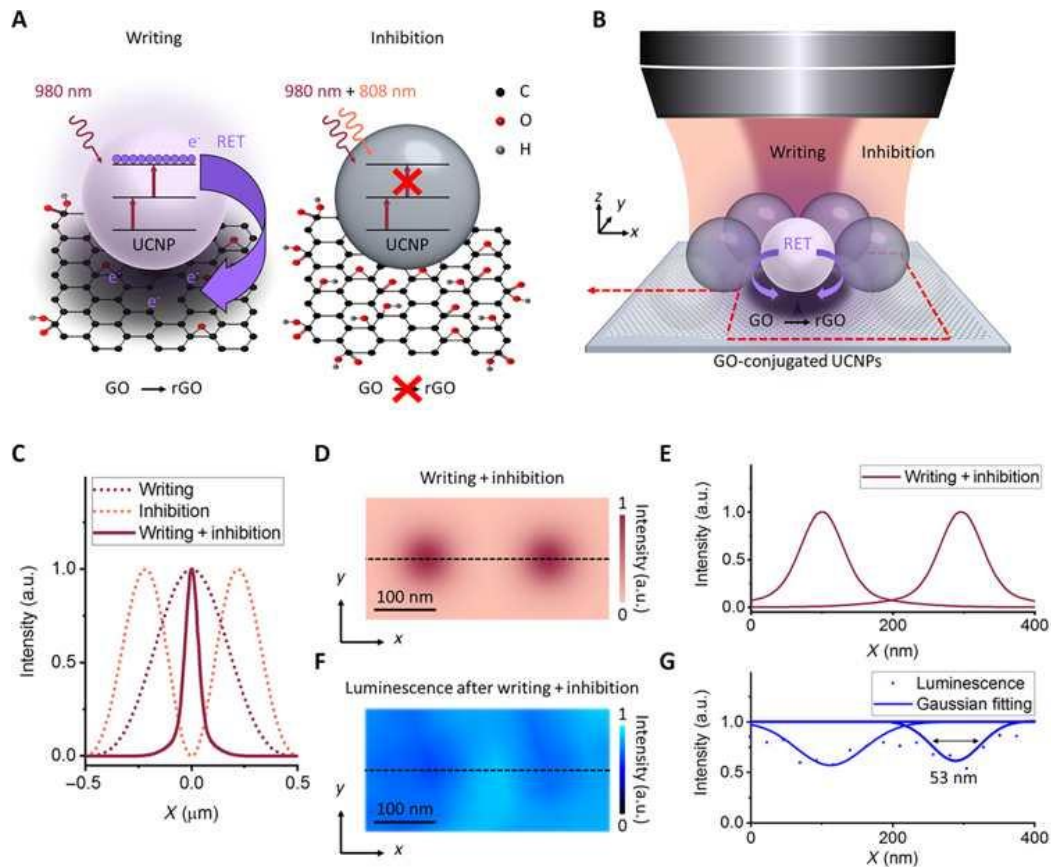


Рис. 7. Принцип оптичного запису нанорозмірних елементів з резонансною передачею енергії від нанокompatитів лантанодів наночастинкам оксиду графену [10]

Значна увага приділяється створенню нових люмінофорів у склі з тривалим післясвіченням (PiG) для створення новітніх носіїв для систем оптичного зберігання даних. За допомогою твердофазних реакцій і унікальних методів модуляції спектра було виготовлено люмінофори у склі з тривалим післясвіченням. $\text{Lu}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$ (LuAGG: $\text{Ce}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$) на основі скла TBZNA, які випромінюють яскраво-зелений світловий сигнал, розташований у діапазоні 350 та 420 нм [24].

Аналіз можливостей створення оптичних носіїв з об'ємним записом

Компанія Folio Photonics (заснована в 2012 році) пропонує створювати багаточарові оптичні носії Data Film Disc™ (DFD) на базі тонкоплівкових полімерних плівок. У цьому процесі використовується тонка гнучка полімерна плівка, яку можна розрізати та наклеювати на диски. При цьому аналізувалася можливість

використання 64-тонкоплівкових шарів. Data Film Disc™ (DFD) поєднує в собі високу ємність, тривалий термін служби зі зворотною сумісністю [8, 25, 26].

Висновки

1. Використання методів наноплазмоніки та ближньопольового оптичного запису створює умови для суттєвого збільшення щільності оптичного запису. Недоліком методу плазмонного запису на наночастинках є необхідність здійснення запису та зчитування даних на різних пристроях.

2. Оптичні носії інформації, завдяки тривалому строку зберігання даних та малому споживанню електричної енергії, мають потенційні можливості використання у системах архівного зберігання даних і, в тому числі, у хмарних сховищах. Використання оптичних носіїв у хмарних сховищах обмежується недостатньою ємністю оптичних носіїв з традиційним 2D-записом.

3. Перспективним напрямком суттєвого збільшення ємності оптичних носіїв стало можливим використання 3D-запису з фотолюмінесцентним зчитуванням.

4. Реалізувати відтворення даних, записаних на оптичних носіях у вигляді нанорозмірних структур, можливо тільки з використанням штучних нейронних мереж.

1. How to store everything forever...using compact disks? URL: <https://blog.seagate.com/business/how-to-store-everything-forever-using-compact-disks/> (Last accessed: 29.09.2021).

2. 2021 Data Storage Outlook Report Insight: Storage Technologies and Advancements. URL: <https://spectralogic.com/2021/06/03/2021-data-storage-outlook-report-insight-storage-technologies-and-advancements-blog/> (Last accessed: 29.09.2021).

3. Petrov V.V., Z. Le, Kryuchyn A.A., et al. Long-term storage of digital information, National Academy of Sciences of Ukraine, Institute for Information Recording. Kyiv: Akadempriodyka, 2018. 148 p. ISBN 978-966-360-360-5.

4. Petrov V.V., Semynozhenko V.P., Puzikov V.M., et al. Method of aberration compensation in sapphire optical discs for the long term data storage. *Functional Materials*. 2014. Vol. 21, No 1. P. 105–111.

5. Viacheslav Petrov, Andriy Kryuchyn, and Ivan Gorbov. High-density optical disks for long-term information storage. Proc. SPIE 8011, 22nd Congress of the International Commission for Optics: Light for the Development of the World, 80112J (25 October 2011). <https://doi.org/10.1117/12.900745>.

6. Петров В.В., Крючин А.А., Шанойло С.М. та ін. Надщільний оптичний запис інформації. Київ: ІПІ НАН України, 2009. 282 с.

7. Jiang Meiling, Zhang Mingsi, Li Xiangping, et al. Research progress of super-resolution optical data storage [J]. *Opto-Electronic Engineering*. 2019. **46**(3): 180649. doi: 10.12086/oe.2019.180649.

8. Kenneth D. Singer and Irina Shiyanovskaya. Co-extruded multilayer optical data storage media (Conference Presentation). Proc. SPIE 11305, Ultra-High-Definition Imaging Systems III, 1130504 (9 March 2020). <https://doi.org/10.1117/12.2553638>.

9. Xiangping Li. Nanoparticle-based multi-dimensional optical data storage. December 26, 2013. URL: <https://www.amazon.com/Nanoparticle-based-multi-dimensional-optical-data-storage/dp/3659502170> (Last accessed: 29.09.2021).

10. Lamon S., Wu Y., Zhang Q., Liu X., Gu M. Nanoscale optical writing through upconversion resonance energy transfer. *Science Advances*. 24 Feb 2021. Vol. 7, No. 9. eabe2209. DOI: 10.1126/sciadv.abe2209.

11. Shiono T., Matsuzaki K., & Furumiya S. (2013). Near-field recording on phase-change nanoparticles and reflective reproduction from nanoantenna utilizing plasmonic resonance for high-density optical memory. *Optics Express*. 2013, Oct 21; 21(21):25532-43. doi:10.1364/oe.21.025532.

12. Gu, M., Zhang, Q. & Lamon, S. Nanomaterials for optical data storage. *Nat. Rev. Mater.* 2016. **1**. 16070. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.70>.
13. Project Silica. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/project-silica> (Last accessed: 29.09.2021).
14. Sinjeung Park and Jae Won Hahn. Plasmonic data storage medium with metallic nano-aperture array embedded in dielectric material. *Optics Express*. 2009. Vol. 17, Issue 22. P. 20203–20210. <https://doi.org/10.1364/OE.17.020203>.
15. M. Mansuripur, A.R. Zakharian, A. Lesuffleur, Sang-Hyun Oh, R.J. Jones, N.C. Lindquist, Hyungsoon Im, A. Kobayakov, and J.V. Moloney Plasmonic nano-structures for optical data storage. *Optics Express*. 2009. Vol. 17, Issue 16. P. 14001–14014. <https://doi.org/10.1364/OE.17.014001>.
16. W.T. Chen, P.C. Wu, C.J. Chen, C.-J. Weng, H.-C. Lee, T.-J. Yen, C.-H. Kuan, M. Mansuripur, and D.P. Tsai Manipulation of multidimensional plasmonic spectra for information storage. *Appl. Phys. Lett.* 2011. **98**(17). 171106. <https://doi.org/10.1063/1.3584020>.
17. O'Connor, D., & Zayats, A.V. The third plasmonic revolution. *Nature Nanotechnology*. 2010 Jul. **5**(7). P. 482–483. doi:10.1038/nnano.2010.137.
18. Zijlstra, P., Chon, J. & Gu, M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods. *Nature*. 2009. **459**. P. 410–413. <https://doi.org/10.1038/nature08053>.
19. Bergman, David J., Stockman, Mark I. Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation: Quantum Generation of Coherent Surface Plasmons in Nanosystems. *Physical Review Letters*. 17 January 2003. Vol. 90, Issue 2. 027402.
20. Wiecha P.R., Lecestre A., Mallet N., et al. Pushing the limits of optical information storage using deep learning. *Nature Nanotechnology*. 2019. **14**. 237–244. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0346-1>.
21. Miroshnichenko A. Deep learning beats the optical diffraction limit. *Nature Nanotechnology*. 2019. **14**. P. 198–199. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0357-y>.
22. K. de Haan, Y. Rivenson, Y. Wu, A. Ozcan Deep-Learning-Based Image Reconstruction and Enhancement in Optical Microscopy. *Proc. of the IEEE*. January 2020. Vol. 108, Issue 1. P. 30–50. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2949575.
23. Yue, T., Wu, Z., Li, F. et al. A Youla-parameterized Gap Control for Next Generation of Optical Storage Systems. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2021. Vol. 19. P. 2068–2078. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0401-1>.
24. Lin, S., Lin, H., Ma, C., Cheng, Y., Ye, S., Lin, F., Wang, Y. High-security-level multi-dimensional optical storage medium: nanostructured glass embedded with LiGa5O8: Mn²⁺ with photostimulated luminescence. *Light: Science & Applications*. 2020. **9**(1). doi:10.1038/s41377-020-0258-3.
25. An J.M., Zhao X., Li D.S., Zhang Y.J., Fei F., Pun E.Y.B., & Lin H. New insights into phosphorescence properties of LuAGG: Long afterglow phosphor-in-glass for optical data storage. *Ceramics International*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.155> (Last accessed: 29.09.2021).
26. Folio Photonics Raises \$8M in Seed Funding <https://www.finsmes.com/2019/05/folio-photonics-raises-8m-in-seed-funding.html> (Last accessed: 29.09.2021).

Надійшла до редакції 02.09.2021