

УДК 004.085

Є. Є. Голдаєвич

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Ближнє поле та його застосування для надщільного запису інформації

Розглянуто можливість запису та зчитування цифрових даних за допомогою ближнього поля. Подано визначення ближнього поля. Наведено приклад побудови оптоволоконних зондів для ближньопольової системи запису інформації.

Ключові слова: лазер, компакт-диск, універсальний цифровий диск, дифракція, нанооптика, ближньопольова оптика, ближньопольовий скануючий оптичний мікроскоп, оптоволокно, плазмон.

Вступ

Ще зовсім нещодавно вважалось, що межу можливому в оптиці ставить релеєвський критерій роздільної здатності оптичних приладів. Він полягає в тому, що мінімальний розмір розрізняваного об'єкта дещо менший за довжину хвилі використовуваного світла і принципово обмежений дифракцією випромінювання. Технічне підтвердження роботи звичайних оптичних систем у наш час можна знайти повсюди, популярними стали носії інформації на компакт-дисках (CD) та нових універсальних цифрових дисках (DVD), що пропонують підвищену щільність інформації на носії — кілька Гбіт на кв.дюйм [1]. Проте останнім часом з'явилась і викликає все більшу увагу можливість вивчення та формування оптичними методами різноманітних структур нанометрових розмірів, які у багато разів менші за довжину світлової хвилі λ . Така можливість виникла у зв'язку з розвитком ближньопольової оптики (БПО) — нового та надзвичайно перспективного напрямку фізичної та прикладної оптики. З фізичної точки зору вона базується на присутності в дальній зоні випромінювання цілком ідентифікованих слідів взаємодії світла з мікрооб'єктом, що знаходиться у ближньому світловому полі, яке локалізоване на відстанях набагато менших за λ . У технічному сенсі БПО поєднує елементи звичайної оптики та скануючої зондової мікроскопії.

© Є. Є. Голдаєвич

Фізичні принципи ближньопольової оптики

Основним елементом ближньопольових приладів є оптичний зонд (див. рис.) у вигляді загостреного оптичного волокна 1. Конусна поверхня зонда частково вкрита непрозорим шаром металу 2, так, що в результаті на кінці зонда формується отвір дуже малого розміру ($\lambda/20 - \lambda/40$).

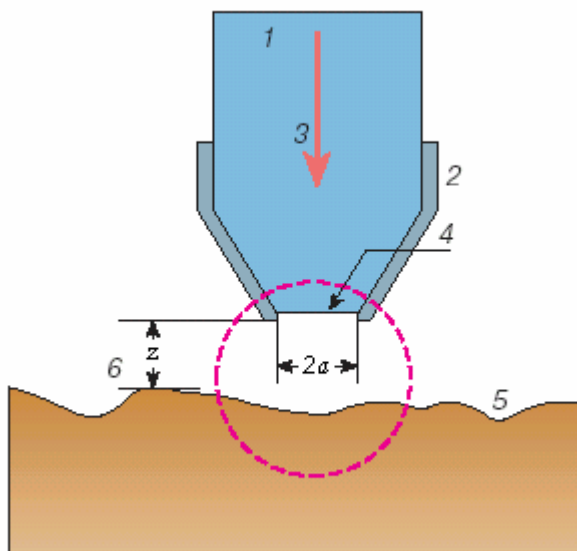


Схема оптоволоконного ближньопольового зонда: 1 — загострене оптичне волокно; 2 — металеве покриття; 3 — лазерне випромінювання, що проходить крізь зонд; 4 — вихідна апертура зонда, $2a \ll \lambda$; 5 — поверхня досліджуваного зразка (носія); 6 — відстань між досліджуваною поверхнею та апертурою зонда, $z \ll \lambda$. Штрихами позначена область ближньопольового контакту

Частина світлового потоку, який розповсюджується волокном, проходить крізь вихідний переріз зонда як крізь діафрагму в металевому екрані та досягає зразка, розташованого у ближньому полі джерела. Якщо відстань z до поверхні зразка і радіус a діафрагми задовольняють умові $a, z \ll \lambda$, то розмір світлової плями на зразку близький до розміру діафрагми. Переміщуючи зонд поверхнею, можна реалізувати роздільну здатність, що не обмежена дифракцією. Теоретично показано і експериментально підтверджено [4], що для алюмінієвої діафрагми гранична роздільна здатність складає біля 13 нм, що майже в 30 разів менше за довжину хвилі синього лазера.

Подібна ідея була запропонована ще в 1928 р. Сингхом (E.H. Syngh). Вона набагато випередила технічні можливості свого часу і залишилася практично не поміченою. Її перше підтвердження було отримане Ешем (E.A. Ash) у дослідях з мікрохвилями в 1972 р. На початку 80-х років 20-го століття група дослідників з Цюрихської лабораторії фірми IBM на чолі з Дітером Полем (D.W. Pohl) проникли всередину дифракційної межі та продемонстрували роздільну здатність $\lambda/20$ на приладі, який працює у видимому оптичному діапазоні і отримав назву ближньопольового скануючого оптичного мікроскопа (БСОМ) [2]. Трохи раніше в тій же

лабораторії був створений перший скануючий тунельний мікроскоп, завдяки якому вона стала відома в усьому світі [2].

На відміну від тунельного та атомно-силового мікроскопів, які одразу завоювали визнання, БСОМ деякий час залишався в тіні. Унікальні можливості БСОМ були переконливо продемонстровані лише на початку 90-х років 20-го століття, коли вдалось вирішити дві важливі технічні проблеми: істотно підвищити енергетичну ефективність зондів та забезпечити надійний контроль відстані між вістрям і зразком. Останніми роками в десятках лабораторій успішно ведуться роботи з використання БСОМ у вирішенні широкого кола задач фізики поверхні, біології, техніці запису та зчитування інформації тощо.

Критерій Релея є однією з ілюстрацій принципу невизначеності Гейзенберга, згідно з яким кожна спроба підвищити ступінь локалізації чи точність визначення положення Δx джерела світла призводить до зростання невизначеності Δp_x спряженого імпульсу фотонів. За умови розсіювання фотонів у максимальному діапазоні кутів $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$, $\Delta p_x = h\Delta k_x = 4\pi h/\lambda$ (h — стала Планка, k_x — x -а компонента хвильового вектора k) і $\Delta x \geq \lambda/2$. Можливість реалізації розв'язання $\Delta x \ll \lambda/2$, здавалось би, суперечить одному з основних фізичних принципів. Слід, проте, мати на увазі, що співвідношення невизначеності в самому загальному вигляді відноситься до положення частки в імпульсно-координатному просторі. Тому, обмежуючи одну з компонент хвильового вектора, воно дозволяє варіювати інші. Можна покласти, наприклад,

$$k_y = 0, \quad k_z = i\gamma,$$

де γ — дійсне додатне число. Тоді $k_x = \sqrt{(k^2 - k_z^2)} = \sqrt{(k^2 + \gamma^2)} > k$. При $\gamma \rightarrow \infty$ область допустимих значень k_x необмежено зростає, а Δx може бути скільки завгодно малим.

Уявним k_z відповідають затухаючі хвилі. Отже, за умови реалізації субхвильового розв'язання антена-зонд повинна розташовуватись у межах затухаючого поля поблизу поверхні зразка (носія), тобто заздалегідь при $z \ll \lambda$.

Можна тепер уточнити поняття ближнього поля [3], асоціюючи його з областю існування затухаючих і, отже, нерадіаційних хвиль, амплітуда яких змінюється з відстанню z від границі розділу середовищ чи малого розсіюючого об'єкта за законом $E(z) = E(0)\exp(-gz)$, де $g > 0$. Величина g^{-1} характеризує глибину проникнення затухаючої хвилі й за порядком сумірна з розмірами субхвильового розсіювача. Зокрема, для діафрагми радіуса a в тонкому провіджучому екрані $g^{-1} \approx 2a$. Для поверхні зі складним рельєфом величина g^{-1} визначається сумарним внеском компонент спектру просторових частот, причому m -а компонента з періодом $dm \ll \lambda$ може бути виявлена на відстані $z \leq \gamma_{m \gg dm}^{-1}/2\pi$. (В режимі збирання фотонів точність відтворення профілю поверхні зростає з підвищенням кількості m компонент затухаючого поля, які беруть участь у створенні зображення, а отже, із зменшенням z). У дальньому полі при $z \geq \lambda$ присутні тільки хвилі, що розповсюджуються, до яких можна застосовувати закони та обмеження звичайної оптики. Звісно, що вони також роблять свій внесок до результуючого поля в ближній хвильовій зоні. Структуру ближнього поля можуть також визначати і різного роду

поверхневі резонансні електромагнітні моди, що збуджуються світлом поблизу вихідного розрізу зонда (наприклад, поверхневі плаزمони) [3].

Зважаючи на вищесказане, можна зауважити, що методи БПО цікаві для наноелектроніки, де вони дозволяють досліджувати поверхню і топологію елементів з високою локальністю. Разом з тим можна створювати на поверхню та тонкий шар «силовий» вплив (зокрема, модифікувати їх структуру), якщо ближнє поле характеризується високою напруженістю. Цей напрямок застосування БПО, який до того ж називається нанооптикою, також інтенсивно розвивається. Прикладом може служити нанесення за допомогою БСОМ різноманітних малюнків, характерний розмір яких складає 50–70 нм.

Аналіз можливості застосування БПО в системах оптичного та магнітного запису інформації

Можливість у кілька разів покращити роздільну здатність при фотолітографії, а також на порядок і більше підвищити щільність запису інформації (наприклад, на магнітооптичних середовищах, фоточутливих полімерних матеріалах) є надзвичайно привабливою і стимулює велику кількість робіт, які спрямовані на вирішення цих задач та складнощів, яке супроводжується винайденням нових аналітичних та технічних методів фізико-математичного опису проблеми та конструювання компактних, недорогих, швидкодіючих систем ближньопольового запису та зчитування інформації.

Наприклад, одним із складнощів у використанні зонда у вигляді металізованого загостреного волокна в пристроях зберігання даних є неможливість сканування на великих швидкостях. Здається очевидним, що пристрої, які базуються на одному гнучкому зонді, не будуть мати достатньої пропускної спроможності приводного механізму для підтримки необхідної відстані між кінцем зонда та носієм, забезпечуючи при цьому високу швидкість запису (зчитування) даних та короткі за часом переходи. Великий, паралельно працюючий, масив зондів міг би вирішити цю проблему [5]. Не тільки тому, що це могло би збільшити швидкість обробки даних пристроєм, але й, якби кожен зонд сканував би тільки невелику ділянку, тоді також були б можливі короткі за часом переходи до обробки інших блоків даних. Масиви такого роду зіштовхуються з серйозними проблемами, не останньою з яких є зношення зондів.

Підхід до вирішення такої проблеми включає виготовлення хвильоводів на зворотному боці повзуна (схожого до того, що використовується в жорстких магнітних дисках) з отворами, меншими за довжину хвилі, зробленими в металічному покритті, яким закінчується хвильовід. Невеликі апертури (менше 10 нм) разом з низькою висотою переміщення над поверхнею (нижче 20 нм), могли б створити дуже малі за розміром плями та вирішити проблему механізму переміщення апертури над носієм. Це було підтверджене одним із досліджень [1], в якому було отримано щільність інформації в 60 Гбіт/кв.дюйм зі швидкістю її обробки 0,25 кбіт на секунду. Нажаль, крихітна відстань, яка необхідна для ближньопольового запису може не спрацювати для змінних носіїв. Також маленькі апертури пропускають мало світла; більшість світла відбивається та являє собою велике джерело фотонного шуму.

Ще одна можливість використання БПО для надщільного запису інформації виходить із дослідження французьких і японських вчених [6], які розробили напівпровідниковий поверхнево-випромінюючий лазер, виготовлений з матеріалу з високим коефіцієнтом переломлення. Матеріал відбиває безпосередньо згенероване світло таким чином, що випромінювання за межами пристрою є дуже слабким. Проблема вирішувалась розташуванням металевої плівки з наноотворами між цим матеріалом та зовнішнім середовищем. Механізм проходження світла через ці отвори (розміри яких набагато менші за довжину хвилі випромінювання $z \ll \lambda$) роз'яснюється плазмонами, що виникають на поверхні металевої плівки довкола субхвильового наноотвору за умови її опромінювання лазером, і які утворюють малі магнітні диполі, які в, свою чергу, вишикуються вздовж напрямку поляризації падаючого світлового опромінювання. Ці дослідження показують також, що збільшення кількості випромінюваного світла поза наноотворами залежить також від форми самих отворів, а саме, найбільший результат був досягнутий з наноотворами прямокутної форми з розмірами 75 нм на 225 нм, ніж з наноотворами круглої форми діаметром 190 нм [6]. Таким чином, за допомогою такої структури можна створювати нанорозмірні світлові плями більшої інтенсивності на поверхні носія інформації, що дозволить збільшити відношення сигнал-шум (відношення інтенсивності світла плями до інтенсивності розсіяного світла), а, отже, дасть можливість записувати інформацію з більшою щільністю, розрізняти записану інформацію при зчитуванні, зменшити витрати на побудову відповідних приладів, а також дасть поштовх для подальшого ущільнення зберігання інформації.

Висновки

Підсумовуючи сказане, можна стверджувати, що даний напрямок розвитку науки та техніки, а саме ближньопольовий запис інформації, є надзвичайно важливим для сучасного інформаційного суспільства з його зростаючими потребами в збільшенні об'ємів носіїв інформації та зменшенні їх розмірів, чи, принаймні, збільшенні щільності інформації на носіях з незмінними розмірами (як, наприклад, збільшення місткості інформації на компакт-дисках із збереженням їх стандартизованих розмірів). Про це свідчать отримані результати [1, 2, 4, 6], а саме:

- розмір світлової плями може бути створеним набагато меншим за довжину хвилі випромінюваного світла;
- сконструйовані прилади для сканування нанорозмірної області поверхні, наприклад, БСОМ;
- за допомогою БСОМ можна записувати інформацію на поверхню носія;
- винайдено модифікації зондів ближньопольових записуючих пристроїв, які прискорюють процедуру запису/зчитування інформації, а також покращують процедуру їх заміни у випадку виходу з ладу;
- перевірено на практиці, що інтенсивність вихідного випромінювання через наноотвори залежить від їх геометричних розмірів.

Слід також зазначити, що ближньопольовий запис ще не має повного, чіткого наукового апарата для свого опису, а, здебільшого, базується на практичних дос-

лідженнях науковців, які ставлять експерименти, базуючись на теоретичних знаннях нанооптики, а також знаннях попередніх експериментаторів у цій області.

1. *Kim J., Song K.B., Park K.H., Lee H.W. and Kim E.* Simple Near-Field Optical Recording Using Bent Cantilever Probes // *ETRI J.* — 2002. — Vol. 24, N 3. — P. 205–209.
2. *Pohl D.W., Denk W., Lanz M.* // *App. Phys. Lett.* — 1984. — Vol. 44. — P. 651–664.
3. *Либенсон Н.М.* Преодоление дифракционного предела в оптике // *Соросовский образовательный журнал.* — 2000. — Т. 6, № 3. — С. 99–104.
4. *Wang W.J., Hong M.H., Wu D.J., Goh Y.W., Luk'yanchuk B.S., Chong T.C.* Ultrafast Laser Recording in Optical Near-Field for High-Density Optical Storage // *Proc. SPIE.* — Vancouver. — 2003. — Vol. 5069. — P. 330–334.
5. *Seigler M., Lambeth D.* Will Near-Field Recording Give MO More Byte // *DATA Storage.* — 1999.
6. *Hellemans A.* Nanoholes Permit Remarkable Light Transmission // *IEEE Spectrum.* — 2004. — Vol. 41, N 7. — P. 18.

Надійшла до редакції 17.11.2004