

УДК 004.085

Є. В. Беляк

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

Математичне моделювання процесу зчитування даних з багат шарового фотолюмінесцентного носія інформації

Проведено аналіз задачі ефективної організації структури об'ємного оптичного носія інформації. Запропоновано математичну модель, що дає можливість за допомогою програмних засобів співвідносити параметри багат шарового фотолюмінесцентного диска з амплітудою сигналу зчитування та показником сигнал-шум. Розраховано оптимальну конфігурацію елементів інформаційного шару даного носія.

Ключові слова: оптичний запис інформації, об'ємні носії, багат шаровий фотолюмінесцентний диск, математична модель, інформаційний шар, сигнал зчитування, паразитний сигнал.

Вступ

Принципові обмеження на подальше збільшення інформаційної ємності оптичних дисків, що досі пов'язувалось зі збільшенням поверхневої щільності запису, спонукають розробників зосередити увагу на методах побудови об'ємних оптичних носіїв даних. У даній галузі найбільш перспективним підходом є метод багат шарового фотолюмінесцентного запису [1–3, 6], що надає можливість у десятки разів збільшити ємність носія і при цьому забезпечити сумісність пристрою зчитування з попередніми форматами оптичних дисків (CD, DVD, BD).

На сьогоднішній день запропоновано велику кількість методів об'ємного оптичного запису, розроблено прототипи багат шарових фотолюмінесцентних дисків (FMD). Слід зазначити, що для даного типу носіїв характерні специфічні вади, як то мала швидкість зчитування даних, низькій рівень сигналу зчитування, високий рівень паразитного сигналу і проблеми, пов'язані з вертикальним позиціонуванням оптичної головки приводу. Тим не менш, синтез ефективних реєструвальних середовищ [4, 6], оптимізація структури інформаційного шару, варіювання товщиною проміжних шарів, внесення змін до електрооптичної схеми приводу [3, 6] і застосування методів паралельного зчитування [5] дозволяють привести зазначені параметри до рівня відбивальних дисків. Можна припустити, що інерційність при впровадженні носіїв FMD у виробництво та продаж, викликана тим,

© Є. В. Беляк

що великий практичний досвід у даному випадку складається з поодиноких і різнорідних досліджень, у рамках яких часто не розглядалися технологічні аспекти впровадження, в той час як для відбивальних дисків протягом десятків років отримані результати підлягали узагальненню та стандартизації.

З метою вирішення зазначеної проблеми було запропоновано розробити математичну модель фокусування лазерного променя на інформаційному елементі (піті) багат шарової структури FMD-носія. У зв'язку з тим, що середовище фотолюмінесцентного диска є оптично однорідним, а піти — прозорими (на 90 % і більше), і таким чином можна нехтувати дифракцією на краях інформаційного рельєфу, задача суттєво спрощується і вимагає лише розробки відповідного програмного забезпечення. За допомогою розробленої моделі може бути визначено оптимальні значення глибини пітів, товщини проміжного й інформаційного шару, геометричних розмірів і форми носія, коефіцієнта пропускання реєструвального середовища, а також числової апертури і граничне значення виділення сигналу оптичної головки пристрою зчитування. Характерно, що оптимальних рішень, обраних автоматично, максимумів з точки зору кількох показників (сигнал-шум, рівень сигналу зчитування та інформаційна ємність носія), має бути декілька, що є додатковою перевагою при впровадженні об'ємного фотолюмінесцентного запису.

Математична модель фокусування лазерного променя в структурі багат шарового фотолюмінесцентного диска

Як було зазначено, процес зчитування даних з FMD-носіїв надає можливість побудувати просту математичну модель, що на жаль, не може бути здійснено при аналізі відбивальних дисків або інших видів оптичних носіїв. Основою для побудови в даному випадку слугує інтерференційна картина, що формується у фокальній площині променя зчитування. Як відомо, розподіл інтенсивності для сфокусованого і обмеженого діафрагмою потоку світла відбувається за функцією

$$I_{\varphi} = \frac{I_0 \sin^2(b\pi \sin(\varphi)/\lambda)}{(b\pi \sin(\varphi)/\lambda)^2}, \quad (1)$$

де φ — кут між напрямком падіння світла на фокальну площину та нормаллю до фокальної площини; I_0 — інтенсивність світлового потоку, що падає на лінзу об'єктива; b — ширина діафрагми лінзи об'єктива (рис. 1). Даний вираз дає змогу для заданих параметрів оптичного запису сформулювати одновимірну матрицю функції інтенсивності світла по відношенню до відстані від центру інтерференційної картини $I_{\varphi}(x)$. При цьому важливо попередньо провести дослідження та визначити оптимальні параметри переводу інтерференційної картини до цифрової форми, серед яких мають бути радіус зони оцифрування, роздільна здатність і кількість розрядів кожного елемента матриці. Збільшення кожного із зазначених параметрів може відбуватися в необмеженому діапазоні; це, з одного боку, надає можливість для покращення точності моделі, а з іншого — суттєво збільшує час її обробки. В даній роботі було обрано матрицю у 1000 елементів (розрядність кожного елемента — 48 біт, розмір мантиси — 40 біт, розмір експоненти — 7 біт), що охоплює

основний пік розподілу та два побічних, де зосереджено 93,4 % загальної енергії світлового променя (83,4 % припадає на центральну пляму, 7,2 % — на перше кільце і 2,8 % — на друге кільце). Це дозволило за допомогою мінімального використання комп'ютерного ресурсу в короткий термін промодельовати найпростіший випадок фокусування світла у вакуумі з точністю, достатньою для перевірки моделі.

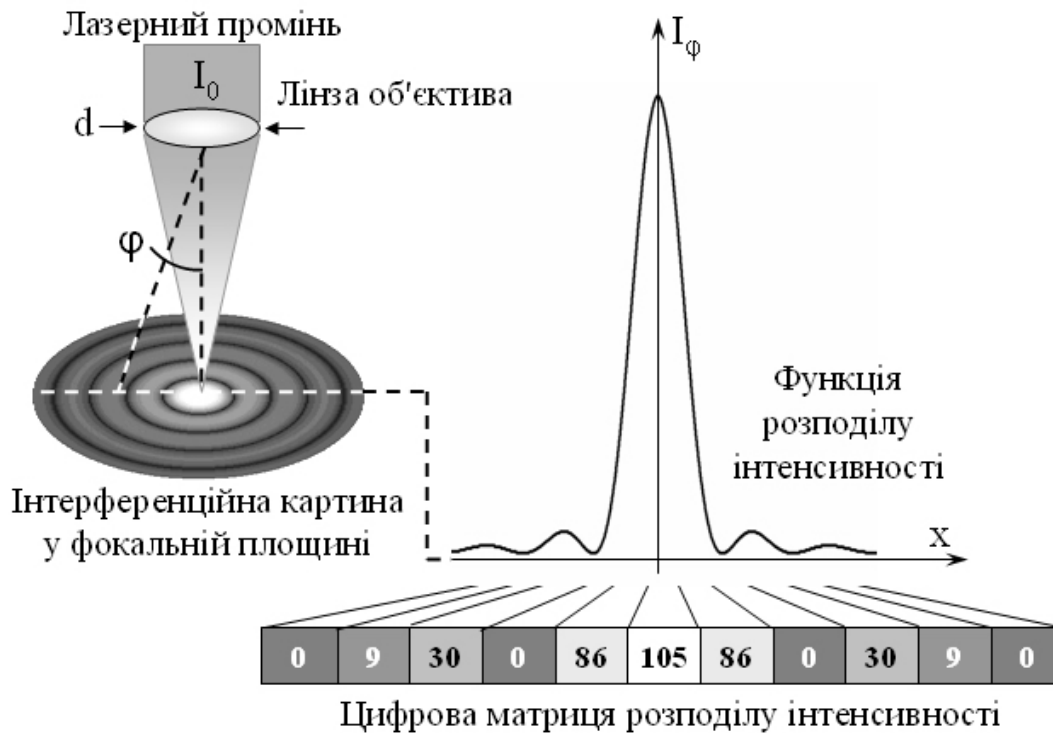


Рис. 1. Переведення інтерференційної картини від сфокусованого променя когерентного світла в одновимірну цифрову матрицю

Наступним етапом є обрахування на основі отриманих даних вертикального зрізу тривимірної функції розподілу інтенсивності у проміжку між лінзою об'єктива та фокальною площиною (при моделюванні процесу зчитування з диска цей проміжок має бути подовжено залежно від того, на якому інформаційному шарі сфокусовано промінь). З цією метою проводиться аналіз проходження світлового потоку від площини горизонтального перетину лінзи до кожного елемента оцифрованої інтерференційної картини. При цьому формуються двовимірні об'єкти трикутної форми, одним з кутів котрих є, власне, елемент початкової одновимірної матриці, що репрезентує собою розподіл інтенсивності у фокальній площині, а двома іншими — край діафрагми (рис. 2). Дані об'єкти являють собою вертикальні зрізи конусів світла, що розповсюджується від оптичної головки приводу, їх лінійні розміри залежать від параметрів лінзи об'єктива та відстані між обраним елементом і центром інтерференційної картини. Якщо аналізується центральна точка інтерференційної картини, то ми отримуємо рівнораменний трику-

тник (рис. 2,а), кут при вершині якого залежить від показника числової апертури лінзи, в інших випадках форма об'єкта порушується, але значення даного кута не змінюється (рис. 2,б). Двовимірну матрицю вертикального зрізу тривимірної функції розподілу інтенсивності можна вважати набором одновимірних матриць, блоки даних яких розширюються при відходженні від початкової матриці фокальної площини. Якщо позначити кількість ненульових елементів у кожній наступній матриці як n_i , значення, якими заповнюються данні елементи як S_i , де i — її порядковий номер (для матриці фокальної площини $i = 0$, а $n_0 = 1$), то для оптичної системи з числовою апертурою $NA = \sin(45^\circ)$, що наближено дорівнює апертурі приводів DVD та HD-DVD-носіїв, можна написати наступне співвідношення:

$$\begin{cases} n_i = 2i + 1, \\ S_i = S_0 / n_i. \end{cases} \quad (2)$$



Рис. 2. Побудова двовимірних матриць, що є складовими вертикального зрізу тривимірної функції розподілу інтенсивності сфокусованого світла: а) аналіз центральної точки інтерференційної картини; б) аналіз першого піку побічного максимуму

Початок блоку даних x_i по відношенню до центра інтерференційної картини буде залежати від положення початкового елемента матриці x_0 і діаметра лінзи d :

$$x_i = \left[x_0 \left(1 - \frac{2i}{d} \right) - \frac{n_i}{2} \right]. \quad (3)$$

Після цього будується двовимірна матриця, що є сумою матриць окремих елементів оцифрованої інтерференційної картини. Отриманий результат показано на рис. 3,а (XY — фокальна площина, Z — напрямок падіння світла, їхній перетин — центр інтерференційної картини). Для того щоб продемонструвати те, як світловий потік розповсюджується до побічних максимумів у програмний код було введено такі параметри яскравості, що у кілька разів перевищували розрядність, з якою кодується система кольорів («True color»: 32 біта). При такому відображенні результатів побудованої моделі найбільш яскраві фрагменти зображення проходять максимум яскравості і знов отримують нульові значення, що відповідають чорному кольору. У випадку градієнтного заповнення основного максимуму (від об'єктива до фокальної площини) можна спостерігати циклічне нарощування яскравості, що відображається набором градієнтних смуг і наочно демонструє, як світло концентрується за інтенсивністю навколо центра інтерференційної картини (рис. 3,б).

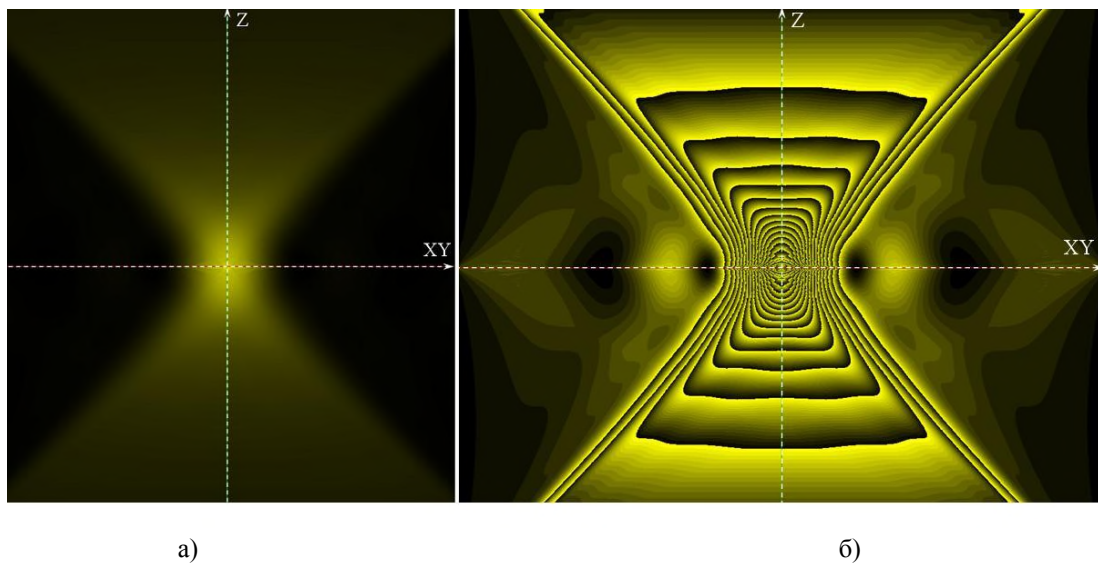


Рис. 3. Вертикальний зріз тривимірної функції розподілу інтенсивності сфокусованого світла у вакуумі: а) для нормального рівня яскравості зображення;
б) для рівня яскравості, що у 10 разів перевищує нормальний

Матриця вертикального зрізу тривимірної функції розподілу інтенсивності була порівняна з результатами, отриманими за допомогою відомої моделі, побудованої на основі методу кінцевих різниць у часовій області FDTD (метод чисельного вирішення задач електродинаміки, заснований на нестандартній дискрети-

зації рівнянь Максвелла в часі та просторі) [7, 8] і отримала цілковите підтвердження.

Застосування результатів, отриманих на основі побудованої моделі

На даному етапі розробки моделі не враховується поглинання світла пітами, тому єдиним результатом, котрий може бути отримано, є знаходження оптимальної форми пітів FMD-носія та оптимального граничного значення виділення корисного сигналу фотодетектором оптичної системи зчитування. Для різних граничних значень на основі отриманої двовимірної матриці були побудовані тривимірні об'єкти (тривимірні кружки Ейрі), що відповідають згусткам світла у фокусі оптичної головки приводу (рис. 4) та співвіднесені з формами пітів відбивальних оптичних дисків.

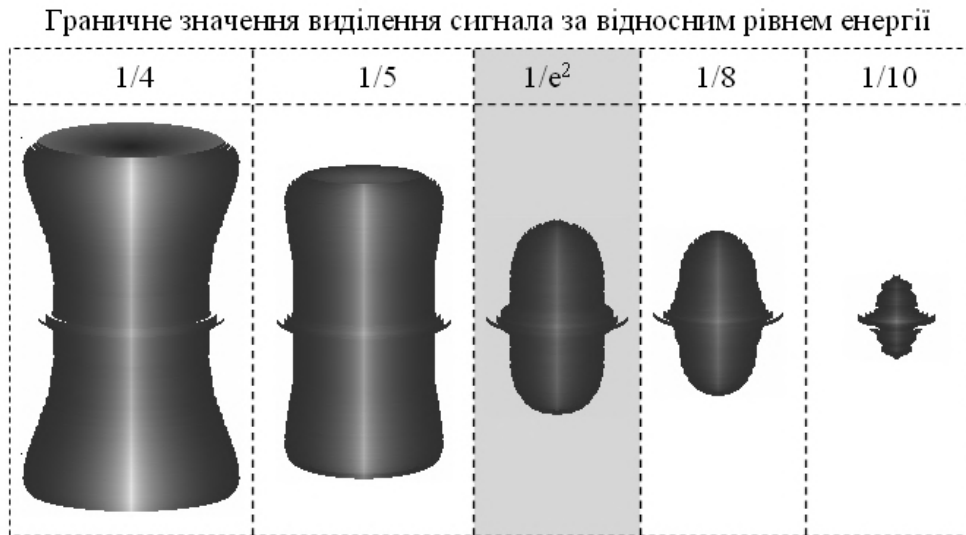


Рис. 4. Тривимірні кружки Ейрі для діапазону граничних значень від 1/4 до 1/10

Як показують результати моделювання, оптимальним граничним значенням за відносним рівнем енергії у даному випадку виявляється $E_{thr} = 1/e^2$, що обирається і для оптичних систем сучасних оптичних приводів з міркувань надійності відтворення сигналу та зменшення елементів інформаційної структури. У даному ж випадку вибір рівня $1/e^2$ є пріоритетним за тієї причини, що при цьому пітом поглинається максимум світлової енергії зондувального променя. З іншого боку можна побачити, що співвідношення глибини та ширини піта фотолюмінесцентного носія має бути змінено; при близьких значеннях ширини та мінімальної довжини піта l та w відповідно, його глибина має складати $h = 2w \approx 2l$, на відміну від відбивальних дисків, де спостерігається зворотна залежність.

Висновки

1. У зв'язку з принциповими обмеженнями на збільшення поверхневої щільності оптичного запису, подальший розвиток у цій галузі пов'язується з метода-

ми побудови об'ємних носіїв, у першу чергу, багат шарових фотолюмінесцентних дисків, приводи яких можуть бути сумісними з сучасними оптичними дисками.

2. Запропоновано математичну модель, за допомогою якої можуть бути визначені оптимальні параметри структури носія інформації (лінійні розміри інформаційного рельєфу, товщина проміжного й інформаційного шару, коефіцієнт пропускання реєструвального середовища) та параметри електрооптичної схеми пристрою зчитування (числова апертура, граничне значення виділення сигналу).

3. За допомогою побудованої моделі було визначено оптимальні значення порогу виділення корисного сигналу за відносним рівнем енергії ($E_{thr} = 1/e^2$) та співвідношення глибини і ширини піта ($h = 2w$).

1. Пат. 7,406,027 США, МКИ G11B 3/70 Optical Data Storage System Having Combined Fluorescent Three-Dimensional Information Carrier // Magnitskii Sergey (Moscow, RU), Pebalk Dimitrij (Moscow, RU), Shubin Vladimir (Moscow, RU), Levich Eugene (New York, NY), Tarasishin Andrey (Moscow, RU), Lezhnev Alexej (Moscow, RU), Kozenkov Vladimir (Dolgoprodniy, RU), Kvasha Mihail (Moscow, RU), Dorozhkina Galina (Dolgoprodniy, RU), Magnitskii Nikolay (Moscow, RU) Appl. — № 11/300,255; Заявл. 13.12.2005; Опубл. 29.07.2008 — 8 с.

2. Пат. 7,226,637 США, МКИ B05D 5/06 Manufacturing Method for Multilayer Fluorescent Information Carriers // Dorozhkina Galina (Dolgoprodniy, RU), Kiryusheva Irina (Tel-Aviv, IL), Levich Eugene (New York, NY), Lezhnev Alexey (Moscow, RU), Pebalk Dmitry (Moscow, RU) Appl. — № 09/761,647; Заявл. 18.01.2001; Опубл. 05.06.2007 — 13 с.

3. *Беляк Є.В.* Методи багат шарового фотолюмінесцентного запису інформації / Є.В. Беляк, В.Г. Кравець, А.А. Крючин // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2007. — Т. 9, № 4. — С. 3–18.

4. *Beliak Ie.V.* Luminescence of the Pyrazoline Dye in Nanostructured Zeolite Matrix / Ie.V. Beliak V.G. Kravets, A.A. Kryuchyn // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2007. — Vol. 10, N. 1. — P. 33–35.

5. *Беляк Є.В.* Методики паралельного зчитування даних з багат шарових фотолюмінесцентних носіїв інформації / Є.В. Беляк, І.В. Горбов, Т.М. Кожан // Вісник Донецького університету. — 2008. — Серія А. Природничі науки. — № 2. — С. 246–250.

6. Надшільний оптичний запис інформації / В.В. Петров, А.А. Крючин, С.М. Шанойло, В.Г. Кравець, І.О. Косско, Є.В. Беляк, А.С. Лапчук, С.О. Костюкевич: Відповідальний редактор О.Г. Додонов — Національна академія наук України, Інститут проблем реєстрації інформації. — Київ: 2009. — 282 с. — ISBN 966-00-0400-1.

7. *Roden J.A.* Convolution PML (CPML): An Efficient FDTD Implementation of the CFS-PML for Arbitrary Media / J.A. Roden, S.D. Gedney // Microwave and Optical Technology Letters. — 2000. — N 27. — P. 334–339.

8. *Rylander T.* Stable FDTD-FEM Hybrid Method for Maxwell's Equations / Bondeson A. // Computer Physics Communications. — 2000. — 125. — P. 75–82.

Надійшла до редакції 08.12.2009