

УДК 004.85

А.С. ЛАПЧУК, А.А. КРЮЧИН

**ПРО ОДИН ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
БАГАТОШАРОВОГО ОПТИЧНОГО ДИСКА**

Анотація. Запропоновано метод розрахунку оптичних параметрів багатошарового оптичного диска формату тільки для зчитування, що зводить задачу синтезу реєструвальних шарів оптичного диска до розв'язку диференціального рівняння першого порядку. Задовольняючи граничним та фізичним умовам, отримана аналітична формула для залежності параметрів реєструвальних шарів від допустимого рівня сигналу. Показано, що застосування інформаційних шарів без дисипативних втрат дозволяє створювати носії інформації ROM-формату, що можуть мати декілька десятків реєструвальних шарів з інформаційною ємністю 500–2000 Гбайт. Запропоновано використовувати оксид титану як реєструвальні шари.

Ключові слова: багатошаровий оптичний диск, оптичний запис, моделювання, диференціальне рівняння, дисипативні втрати, оксид титану.

Аннотация. Предложен метод расчета оптических параметров многослойного оптического диска формата только для считывания, что сводит задачу синтеза регистрирующих слоев оптического диска к решению дифференциального уравнения. Удовлетворяя граничным и физическим условиям, получена аналитическая формула для зависимости параметров регистрационных слоев от допустимого уровня сигнала. Показано, что применение информационных слоев без диссипативных потерь позволяет создавать носители информации ROM-формата, которые могут иметь несколько десятков регистрирующих слоев с информационной емкостью 500–2000 Гбайт. Предложено использовать оксид титана в качестве регистрирующих слоев.

Ключевые слова: многослойный оптический диск, оптическая запись, моделирование, дифференциальное уравнение, диссипативные потери, оксид титана.

Abstract. A method for calculation of optical parameters of multilayer read-only optical disc is proposed, which reduces the synthesis problem of optical disc recording layers to the solution of first order differential equation. By satisfying boundary and physics conditions, an analytical formula is obtained for the dependence of parameters of recording layers from acceptable signal level. It is shown that using information layers without dissipative losses allows us to create ROM-format media having dozens of layers with information capacity of 500-2000 GB. The titanium oxide has been proposed to be used as recording layers.

Key words: multilayer optical disc, modeling optic parameters, first order differential equation, dissipative losses, titanium oxide.

1. Вступ

Оптичні методи успішно і широко застосовуються в інформаційних технологіях для масового тиражування інформації, довготривалого зберігання даних і переносу інформації з комп'ютера на комп'ютер. Швидкий розвиток електронних і магнітних методів реєстрації інформації та швидкий ріст вимог на обсяги і швидкість зчитування інформації диктують необхідність досліджень, направлених на значне підвищення щільності оптичного запису інформації.

Одним із найбільш перспективних оптичних методів запису інформації, в плані значного підвищення інформаційної ємності дисків, є запис в об'ємі диска на реєструвальних шарах, що розміщені в об'ємі носія один над одним. Цей метод дозволяє в N разів збільшити ємність носія інформації без збільшення щільності інформації одного шару. В наш

час докладаються значні зусилля щодо розробки технології багатошарового методу запису [1–11]. Першу структуру багатошарового диска – шестишаровий диск формату тільки для зчитування (ROM-формат) – було продемонстровано Imano та ін. [1]. Цій же групі вдалося отримати позитивний результат для оптичного диска з чотирма реєструвальними шарами для випадку, коли для запису даних використовувались органічні барвники [2]. Багатошаровий запис був реалізований технічно як двошаровий диск DVD ROM-формату, що вміщував до 8,5 Гбайт інформації. Було також розроблено і налагоджено масовий випуск двошарового записуваного (WO-формат) DVD-диска сумарною ємністю 6,7 Гбайт [3, 4]. Стандарт BluRay-дисків (BD) також включає в себе двошаровий оптичний диск з сумарною ємністю до 50 Гбайт як для ROM, так і для RW та WO-форматів [5–7]. Іноє та ін. продемонстрували макет шістнадцятишарового BD-диска з інформаційною ємністю 512 Гбайт [8]. Mishima з співробітниками опублікували результати по чотирьохшаровому записуваному BD з реєструвальними шарами на основі ZnSiMg-O-S [9].

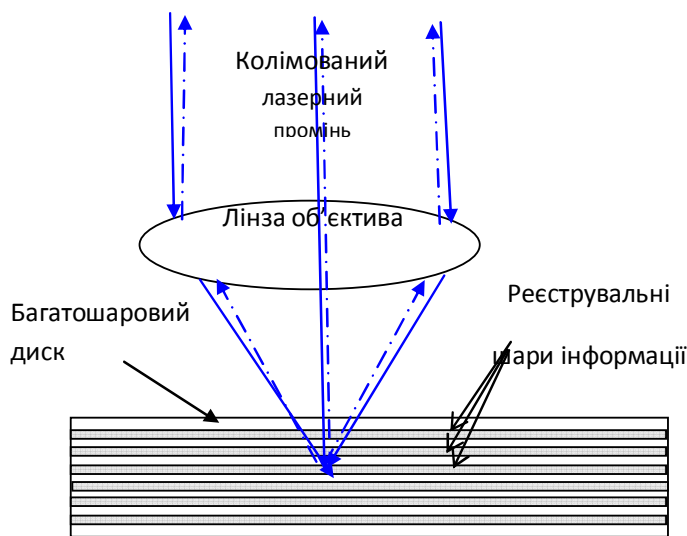


Рис. 1. Оптична схема зчитування інформації з багатошарового диска

На рис. 1 показана оптична схема багатошарового методу запису інформації. Як видно з приведеного рисунка, в багатошаровому методі запис та зчитування інформації із внутрішніх шарів носія лазерним пучком проводиться через верхні реєструвальні шари (рис. 1). При розповсюдженні пучка світла через верхні шари промінь спотворюється і послаблюється. Інформація в багатошаровому диску зчитується шляхом детектування відбитого від реєструвального шару світла, а, значить, при зчитуванні інформації з нижніх шарів промінь двічі проникає через верхні шари. Відбите світло модулюється реєстру-

вальним шаром, фазово або амплітудно, і світло, відбите назад, визначає амплітуду отриманого сигналу. За складності розповсюдження світла в багатошаровому носії інформації методи моделювання їх параметрів зводяться до прямої чисельної оптимізації структури диска з подальшим експериментальним доопрацюванням. Таким чином, Ichimura та ін. провели оптимізацію структури диска і оптичної системи, а також тестування макета для восьмишарового BD RO типу [10, 11]. Моделювання проводилося на основі скалярної моделі. Внаслідок чисельної оптимізації матеріалів шарів, їх товщини і відстані, а також головки зчитування, авторам вдалося досягти однакової інтенсивності сигналу від усіх шарів, малих дисипативних втрат енергії і малого рівня перехресного сигналу. На тестуванні вдалося отримати сигнал зчитування з нижнього шару з нерівномірністю фронтів сигналу (джитеру) не більше 7%. Тобто, було показано, що можна записати, використовуючи оптичну систему BluRay, 200 Гбайт інформації на восьмишаровому BD RWO типу. Пряма чисельна оптимізація, хоча і дозволяє отримати оптимальні параметри диска, проте не дозволяє отримати функціональних залежностей між параметрами реєструвальних шарів і параметрами дисків і висунути вимоги до матеріалів та провести попередні оцінки параметрів диска.

Нас цікавлять диски з великою кількістю реєструвальних шарів. У цьому випадку реєструвальні шари є тонкими і їх параметри повільно міняються від шару до шару. Використовуючи цю особливість, нами був розроблений метод розрахунку параметрів багатошарових дисків на основі стандартних для оптичних дисків матеріалів, металевих та

GeSbTe-плівки [12–13]. Було показано, що при використанні стандартних матеріалів для реєструвальних шарів дисипативні втрати в реєструвальних шарах швидко зменшують інтенсивність світла при розповсюдженні його в глибину диска і тим самим значно обмежують кількість реєструвальних шарів. Тому найбільших успіхів у збільшенні інформаційної ємності можна досягти в тих випадках, коли реєструвальні шари не поглинають світло, а тільки його відбивають, що можливо лише в оптичних дисках формату «тільки для запису» (RO-формат). Проте запропонований нами раніше метод розрахунку не може бути застосований для розрахунку таких дисків.

2. Математична модель багат шарового диска ROM-формату

Розглянемо багат шаровий диск RO-формату, в якому реєструвальні шари не мають дисипативних втрат. Нас цікавлять носії, що можуть вмістити великий обсяг інформації, тобто носії з великою кількістю реєструвальних шарів. При цьому ми припускаємо, що параметри шарів (коефіцієнт відбивання і пропускання) при просуванні вглиб носія інформації змінюються повільно і тому при розрахунку енергетичного балансу променя (розподіл енергії променя під час його проникнення в глибину диска) можна застосувати операцію диференціювання та інтегрування за реєструвальними шарами замість обчислення різниць і сум таким же чином, як це зроблено для реєструвальних шарів з великими втратами [12].

Оптимально спроектований диск повинен мати однаковий рівень сигналу від усіх реєструвальних шарів. Під рівнем сигналу ми розуміємо частину енергії пучка світла, що досягла фотодетектора, відбившись від заданого реєструвального шару. При цьому не повинно враховуватися перевідбите світло. Для випадку багат шарового диска, в якому сигнал зчитується за відбитим променем, умову однакового рівня сигналу для всіх шарів можна записати таким чином:

$$R(n) * T_0^2(n) = \gamma, \quad (1)$$

де через $R(n)$ позначений коефіцієнт відбиття за енергією для n -го шару, а $T_0(n)$ – коефіцієнт проходження за енергією через перші n шарів. Різницю T_0 для двох сусідніх шарів можна представити таким чином:

$$T_0(n) - T_0(n-1) = \frac{P(n)}{P_0} - \frac{P(n-1)}{P_0} = \frac{P(n-1)}{P_0} \left(\frac{P(n)}{P(n-1)} - 1 \right) = T_0(n-1)(T(n) - 1), \quad (2)$$

де $T(n)$ – коефіцієнт проходження через n -й шар носія інформації, $P(n)$ – енергія пучка світла, що без перевідбивання проник через перші n шарів, P_0 – початкова енергія пучка світла. Оскільки у нашому випадку реєструвальні шари не поглинають світло, то із закону збереження енергії можна записати:

$$R(n) + T(n) = 1 \quad (3)$$

або
$$T(n) - 1 = -R(n). \quad (4)$$

З урахуванням (4), рівняння (2) можна переписати як

$$T_0(n) - T_0(n-1) = \frac{dT_0(n)}{dn} = -T_0(n-1)R(n) = -T_0(n) \frac{R(n)}{(1 - R(n))}. \quad (5)$$

Для одержання диференціального рівняння прологарифмуємо рівняння (5):

$$\ln(R(n) * T_0^2(n)) = 2 \ln(T_0^2(n)) + \ln(R(n)) = \ln \gamma \quad (6)$$

і продиференціюємо отримане рівняння (6):

$$2 \frac{dT_0}{dn} \frac{1}{T_0} + \frac{dR}{dn} \frac{1}{R} = 0. \quad (7)$$

Підставивши (4) в рівняння (7), отримаємо диференціальне рівняння відносно коефіцієнта відбиття реєструвального шару як функції номера шару:

$$\frac{dR}{dn} \frac{1}{R} - 2 \frac{R(n)}{(1-R(n))} = 0. \quad (8)$$

Рівняння (8) можна легко проінтегрувати:

$$(1/R^2 - 1/R) dR = 2dn, \quad (9)$$

$$-1/R - \ln R = 2(n - n_0), \quad (10)$$

$$1/R = 2(n_0 - n) - \ln R. \quad (11)$$

Трансцендентне рівняння (11) не має аналітичного розв'язку і для його розв'язку треба застосувати чисельні методи. Проте для нашого випадку коефіцієнт відбиття від одного реєструвального шару, окрім декількох самих нижніх, є малим: $R(n) \ll 1$. Тому для коефіцієнта відбиття від більшості реєструвальних шарів, окрім декількох останніх, виконується нерівність

$$|\ln R| \ll 1/R. \quad (12)$$

З урахуванням нерівності (12), розв'язок рівняння (11) (в першому наближенні) можна записати як

$$-1/R \approx 2(n - n_0), \quad (13)$$

звідки

$$R = -0,5 / (n - n_0). \quad (14)$$

Урахувати логарифмічний член можна у вигляді поправки до отриманого розв'язку (13), застосувавши ітераційний метод. Константу інтегрування можна знайти із умови отримання потрібного рівня сигналу, яку для верхнього шару можна записати як

$$R(1) = \gamma = -0,5 / (1 - n_0) \quad (15)$$

або

$$n_0 = 1 + 0,5 / \gamma. \quad (16)$$

З урахуванням рівняння (16), формулу для залежності коефіцієнта відбиття від номера реєструвального шару можна записати як

$$R(n) = \frac{0,5}{n_0 - n} = \frac{0,5}{1 + 0,5 / \gamma - n} = \frac{0,5\gamma}{(1 - n)\gamma + 0,5}. \quad (17)$$

За даним рівнем сигналу максимальна кількість шарів може бути отримана з умови, що коефіцієнт відбиття від останнього шару має максимальне значення, рівне 1:

$$R(N) = 0,5 / (n_0 - N) = 1, \quad (18)$$

звідки

$$N_0 = n_0 - 0,5 = 1 + 0,5 / \gamma - 0,5 = 0,5(1 + 1 / \gamma). \quad (19)$$

З наведеної формули видно, що при зроблених нами припущеннях і у даному наближенні кількість реєструвальних шарів буде в 2 рази менше, ніж в ідеальному варіанті,

коли потужність променя рівномірно розподілена між усіма реєструвальними шарами, без втрат на відбиття від попередніх шарів:

$$N_1 = 1/\gamma. \quad (20)$$

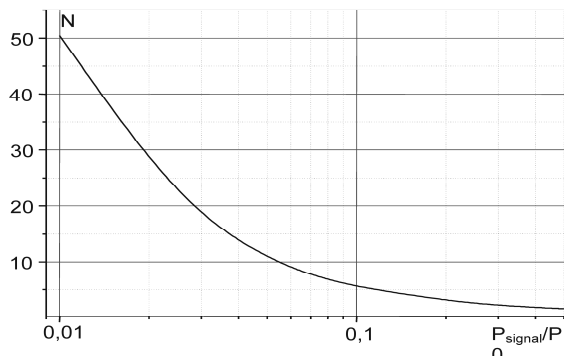


Рис. 2. Залежність максимально можливої кількості шарів у багатошаровому носії інформації від рівня сигналу

На рис. 2 показано залежність максимально можливої кількості реєструвальних шарів від рівня сигналу, розраховану за формулою (19). На рис. 3 і 4 показані коефіцієнти відбиття як функції номера шару для оптичних дисків з 15- і 32-реєструвальними шарами, з рівнями сигналу 3,3% і 1,5% відповідно. Диск з 32-реєструвальними шарами, записаними у форматі BluRay, може вмістити до 800 Гбайт інформації. З наведених графіків видно, що, окрім декількох останніх шарів, коефіцієнт відбиття є плавною функцією від номера реєструвального шару і для всіх, окрім декількох останніх, він набагато менший за одиницю. Тобто припущення, зроблені нами для отримання нашої моделі, виконуються, і тому запропонована модель достатньо точно оцінює параметри багатошарового носія інформації.

З наведених графіків видно, що за причини дуже швидкого збільшення коефіцієнта відбиття для останніх шарів фактично всі реєструвальні шари мають коефіцієнт відбиття менше 0,2.

З наведених графіків видно, що за причини дуже швидкого збільшення коефіцієнта відбиття для останніх шарів фактично всі реєструвальні шари мають коефіцієнт відбиття менше 0,2.

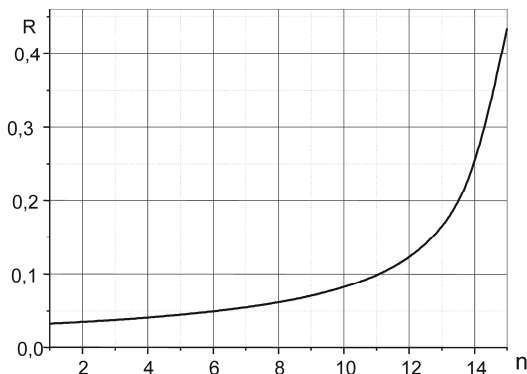


Рис. 3. Залежність коефіцієнта відбиття від номера реєструвального шару за умови, що кожен реєструвальний шар забезпечує рівень сигналу 3,3%

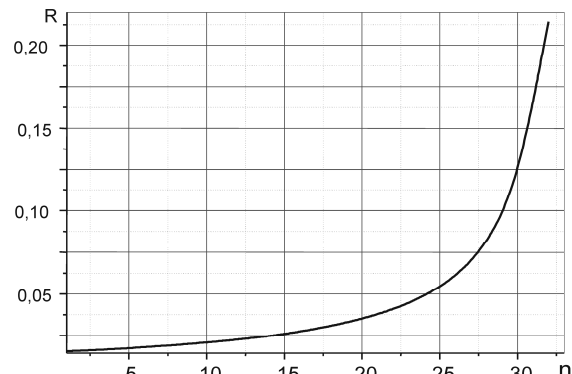


Рис. 4. Залежність коефіцієнта відбиття від номера реєструвального шару за умови, що кожен реєструвальний шар забезпечує рівень сигналу 1,5%

3. Оптичні матеріали для реєструвальних шарів багатошарового оптичного диска

Реєструвальний шар повинен забезпечувати відносно великий коефіцієнт відбиття, а це можливо тільки у випадку, коли оптичний матеріал реєструвального шару має відносно великий індекс заломлення. Проведені оцінки коефіцієнта відбиття від плоского шару за формулами Френеля показали, що реєструвальний шар багатошарового диска повинен мати індекс заломлення не менше, ніж 2,4. Для записуваних і перезаписуваних дисків цей матеріал повинен мати також дисипативні втрати, тому що ефект запису інформації вимагає поглинання світлової енергії.

В табл. 1 наведено комплексні індекси заломлення для матеріалів, які за параметрами найбільш підходять для застосування їх в багатошарових дисках [14]. З наведених у табл. 1 даних видно, що оксиген титану для фіолетового світла має найбільший індекс за-

ломлення із оптичних матеріалів, що не мають суттєвого поглинання світла. Тому він є дуже привабливим для багат шарового диска як реєструвальний шар. Тим більш він цікавий, що має дві можливі кристалічні структури: анатаз та рутил, які мають різні індекси заломлення. Причому, при нагріванні до 400⁰С анатаз безповоротно перетворюється на рутил. Тобто цей матеріал може використовуватися як реєструвальний шар і для RO-формату оптичних дисків. Оскільки це дуже стійкий матеріал, то він може використовуватися і для дисків з довготривалим зберіганням інформації. Проте він не має дисипативних втрат, і тому реєструвальні шари не можуть бути використані для запису інформації. Для створення на його основі багат шарових дисків RO-формату треба використовувати оксид титану разом з іншим матеріалом, що має значний індекс заломлення і достатній рівень дисипативних втрат, які б дозволили зробити запис інформації. Як додатковий матеріал метали не можуть бути використані, оскільки мають великі дисипативні втрати. З наведених у табл. 1 матеріалів найбільше підходять як додаткові матеріали Si_8Ge_2 ($n=5,8+1,34 i$), Si ($n=5,57+0,387 i$), а також $PbSe$ ($n=4,98+i0,173 i$).

Таблиця 1. Комплексний індекс заломлення, $\lambda=405$ нм

| Речовина | Re n | Im n |
|---------------------------------|---------|----------|
| GaP | 4,19600 | 0,275000 |
| Si | 5,57000 | 0,387000 |
| TiO ₂ | 3,40000 | 0,00000 |
| AlSb | 4,57000 | 2,12000 |
| ZnTe | 3,40000 | 0,950000 |
| Si ₈ Ge ₂ | 5,79000 | 1,34000 |
| PbSe | 4,98000 | 0,173000 |
| InP | 4,41500 | 1,73500 |
| InAs | 3,10800 | 1,95700 |
| ZnS | 2,56000 | 0,00000 |
| GaAs | 4,37300 | 2,14600 |
| AlSb | 4,57000 | 2,12000 |

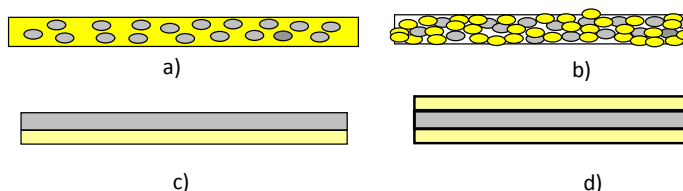


Рис. 5. Структури з декількох матеріалів як реєструвальні шари в багат шаровому носії інформації

При застосуванні додаткового матеріалу для створення реєструвального шару можливі два підходи (рис. 5): а) – створення шару з матриці і наночастинок або суміші наночастинок; б) – розбиття реєструвального шару на декілька однорідних підшарів. Однорідні шари створюються легше і дають більш однорідну структуру. Оскільки однорідна структура забезпечує менші шуми сигналу, із-за відсутності розсіяння на гранулах, то другий підхід видається більш перспектив-

ним. Для розрахунку діелектричних параметрів реєструвального шару, складеного з двох різних матеріалів, можна застосувати метод ефективної діелектричної проникливості. Коли розмір частинок і товщина підшарів набагато менші за довжину хвилі, такий складний шар можна розглядувати як однорідний, діелектрична про-

никливість якого обчислюється за формулою [15]:

$$\varepsilon_{ef} = 2 \frac{\langle \varepsilon \rangle}{1,5\mu^{1/2} + 0,5}, \quad \mu = \langle \varepsilon \rangle \left\langle \frac{1}{\varepsilon} \right\rangle. \quad (21)$$

4. Висновки

Задача розрахунку оптичних характеристик багат шарового диска звелася до диференціального рівняння першого порядку. Розв'язок диференціального рівняння дозволив отримати інженерні формули для розрахунку сигналу детектора в залежності від кількості реєструвальних шарів. Отримані аналітичні формули залежності коефіцієнта відбивання шару від його глибини залягання (від номера) дають можливість чисельного синтезу структури

багатошарового диска. В результаті аналізу залежностей параметрів оптичного диска від оптичних властивостей реєструвального шару запропоновано використовувати оксид титану як оптичне середовище реєструвальних шарів. Показано, що багатошаровий диск на основі оксиду титану може мати до 100 реєструвальних шарів та інформаційну ємність до 2 Тбайт, що на два порядки більше ніж у сучасних оптичних дисках. Також завдяки механічним та хімічним властивостям оксиду титану такий диск є перспективним для довготермінованого збереження інформації.

Розроблені методи розрахунку параметрів багатошарових дисків дозволяють при використанні нових матеріалів з мінімальними втратами збільшити кількість інформаційних шарів і інформаційну ємність оптичних носіїв.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Extending the compact disk format to high capacity for video applications / W.I. Imano, H.J. Rosen, K.A. Rubin [et al.] // Proc. SPIE. – 1994. – Vol. 2338. – P. 254 – 259.
2. Tilevel volumetric optical storage / K.A. Rubin, H.J. Rosen, W.W. Tang [et al.] // Proc. SPIE. – 1994. – Vol. 2338. – P. 247 – 253.
3. Duallayer optical disk with Te-O-Pd phase-change film / K. Nishiuchi, H. Kitaura, N. Yamada [et al.] // Jpn. J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 37, N 4B. – P. 2163 – 2167.
4. Format of an 8.5 GB double-layer DVD recordable disc / P. Woerlee, W. Koppers, H. Martens [et al.] // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5380. – P. 15 – 20.
5. 50 Gbyte read-only dual-layer disk for the high NA objective lens and blue-violet lasers / T. Higuchi, T. Imai, N. Shida [et al.] // Optical Data Storage Topical Meeting 2001 (SPIE). Proc. – Santa Fe: SPIE, 2001. – P. 31 – 33.
6. Multi-layer write-once media with Te-O-Pd films utilizing a violet laser / H. Kitaura, K. Hisada, K. Narumi [et al.] // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4342. – P. 340 – 347.
7. Phase change material for use in a rewritable dual-layer optical disk / N. Yamada, R. Kojima, M. Uno [et al.] // Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4342. – P. 55 – 63.
8. 512 GB recording on 16-layers optical disk with Blu-ray Disk based optics / M. Inoue, A. Kosuda, K. Mishima [et al.] // Proc. SPIE. – 2010. – Vol. 7730. – P. 77300D1–6. I.
9. Norganic write-once disc with quadruple recording layers for Blu-ray disc system / K. Mishima, H. Inoue, M. Aoshima [et al.] // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5069. – P. 90 – 97.
10. Proposal for multi-layer Blu-ray disc structure / I. Ichimura, G. Hashimoto, K. Saito [et al.] // Proc. of International Symposium on Optical Memory 2004. – Jeju: Korea, 2004. – P. 52 – 53.
11. Proposal for a multilayer read-only-memory optical disk structure/ I. Ichimura, K. Saito, T. Yamasaki [et al.] // Appl. Opt. – 2006. – Vol. 45, N 8. – P. 1794 – 1803.
12. Пути совершенствования характеристик запоминающих устройств большой емкости / В.В. Петров, А.А. Крючин, А.И. Бридкий [и др.] // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2010. – Т. 12, № 2. – P. 12 – 24.
13. Optical Parameters of Light Beam in Multilayer Nano-Structures/ S.A. Shylo, A.S. Lapchuk, J.S. Song [et al.] // Journal of the Korean Physical Society. – 2005. – Vol. 47. – P. 18 – 23.
14. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids / E.D. Palik. – New York: Academic Press, 1985. – 980 p.
15. Johnson B.R. Exact theory of electromagnetic scattering by a heterogeneous multilayer sphere in the infinite-layer limit: effective-media approach / B.R. Johnson // J. Opt. Soc. Am. A. – 1999. – Vol. 16, N 4. – P. 845 – 852.

Стаття надійшла до редакції 01.04.2011