

УДК 004.085

**І. В. Горбов**

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна  
тел.: (044) 456-83-89; факс: (044) 241-72-33

## **Вплив показника заломлення матеріалу підкладки на глибину інформаційного рельєфу оптичних носіїв**

*Побудовано модель сигналу відтворення з оптичного носія з рельєфно-фазовим поданням даних. Досліджено залежність сигналу відтворення від глибини інформаційного рельєфу, отриманого на поверхні підкладок із різними показниками заломлення. Для високостабільних оптично прозорих матеріалів визначено необхідні значення глибини рельєфу, при яких розроблені носії довготермінового зберігання даних будуть відповідати формату компакт-дисків і відтворюватися на стандартних приводах оптичних дисків.*

**Ключові слова:** оптичний носій, довготермінове зберігання даних, інформаційний рельєф, сигнал відтворення, компакт-диск.

### **Вступ**

Для архівного збереження цифрової інформації у державних і приватних фондах найчастіше використовуються оптичні носії. Серед сучасних цифрових носіїв вони вважаються найнадійнішими. Але реальний термін служби існуючих оптичних носіїв становить лише 20–30 років, що недостатньо для довготермінового зберігання інформації [1]. Для створення оптичних носіїв для довготермінового зберігання даних пропонується в якості підкладок оптичних носіїв використовувати високостабільні оптично прозорі матеріали, такі як силікатне та кварцове скло, ситал і сапфір [2]. Такі матеріали характеризуються значно кращими оптичними та механічними властивостями порівняно із полікарбонатом, який використовується для серійного виготовлення оптичних дисків [1]. Проте значення показника заломлення наведених матеріалів відрізняється від полікарбонату, що суттєво впливає на сигнал відтворення таких носіїв. Тобто для того, щоб такі носії відтворювалися на стандартних плеєрах оптичних дисків, необхідно визначити параметри інформаційного рельєфу в залежності від показника заломлення матеріалу, на поверхні якого цей рельєф отримано.

© І. В. Горбов

## Модель сигналу відтворення з оптичного носія з рельєфно-фазовим поданням даних

Для запису інформації на сучасних оптичних носіях використовується рельєфно-фазове кодування. Тобто дані записуються у вигляді заглиблень (піт) на поверхні прозорої підкладки, крізь яку лазерним променем відбувається відтворення. Таким чином, сигнали відтворення даних, що подані у вигляді мікрорельєфних структур, залежать від форми заглиблень. Відхилення від форми призводить до погіршення сигналу, що викликає збільшення джитеру, а це, в свою чергу, сприяє появі помилкових бітів у відтвореному сигналі. Саме тому відомі моделі розглядають зміну сигналу відтворення в залежності від зміни лінійних розмірів у площині диска, вважаючи профіль піта ідеальним (трикутник, прямокутник, трапеція), і не враховують вплив глибини [3, 4].

Під час відтворення лазерний промінь проходить крізь прозору підкладку та фокусується на її поверхні, відбивається від металевого відбиваючого шару та реєструється фотоприймачем. Якщо в область опромінення потрапляє піт, то амплітуда відтвореного сигналу зменшується внаслідок інтерференції відбитих променів, які матимуть різну фазу через те, що відбивання променя для кожної точки зони опромінення відбувається в різній фазовій площині (на різній глибині) (рис. 1). Таким чином, амплітуда відтвореного сигналу буде залежати від глибини піта та його розмірів.

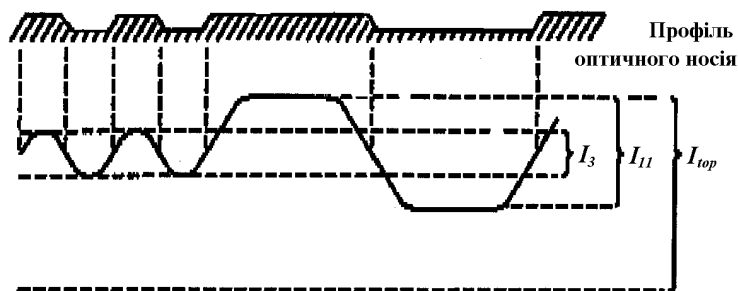


Рис. 1. Сигнал відтворення з оптичного носія з рельєфно-фазовим кодуванням даних:  
 $I_{top}$  — максимальний сигнал відтворення;  $I_3$  — подвоєна амплітуда трьохтактного сигналу;  
 $I_{11}$  — подвоєна амплітуда одинадцятитактного сигналу

У загальному випадку амплітуда сигналу, відбитого з однієї поверхні,  $i(h)$  в залежності від глибини  $h$  може бути виражена таким чином [5]:

$$i(h) = c \cdot i_p \cdot \cos\left(\frac{4\pi n}{\lambda} h\right), \quad (1)$$

де  $n$  — показник заломлення матеріалу підкладки;  $\lambda$  — довжина хвилі лазера в повітрі;  $i_p$  — інтенсивність падаючого світла;  $c$  — коефіцієнт відбиття матеріалу відбиваючого шару. Електричний сигнал фотоприймача пропорційний квадрату інтенсивності світла, що до нього потрапило. Таким чином, для визначення амплі-

туди електричного сигналу  $I(h)$  необхідно зінтегрувати  $i(h)$  по площині опромінення  $S$  та звести до другого ступеня:

$$I(h) = F \left[ \int_s i(h) ds \right]^2 = F \left[ 4c \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2-y^2}} i_p(x, y) \cdot \cos\left(\frac{4\pi n}{\lambda} h \cdot f(x, y)\right) dy dx \right]^2, \quad (2)$$

де  $F$  — коефіцієнт пропорційності фотоприймача;  $f(x, y)$  — функція, яка описує форму піта в координатній площині  $x, y$  з початком координат у центрі зони опромінення;  $R$  — радіус зони опромінення, що для оптичних дисків формату CD становить 850 нм.

Залежність інтенсивності лазерного випромінювання від координати в загальному випадку може бути описана формулою (3), проте для кожного випадку вона може бути різною в залежності від оптичної системи відтворення:

$$i_p(x, y) = i_0 \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{r^2}}, \quad (3)$$

де  $i_0$  — максимальне значення інтенсивності, а параметр  $b_s$  має бути таким, щоб інтенсивність на краю зони дорівнювала  $0,5 i_0$ .

Для моделювання сигналу відтворення необхідно розглянути два випадки, коли довжина піта перевищує діаметр зони опромінення (відтворюються з шести- до одинадцятитактного сигналу) (рис. 2а) та коли довжина піта менша за зону опромінення (відтворюються з трьох- до п'ятитактного сигналу) (рис. 2б).

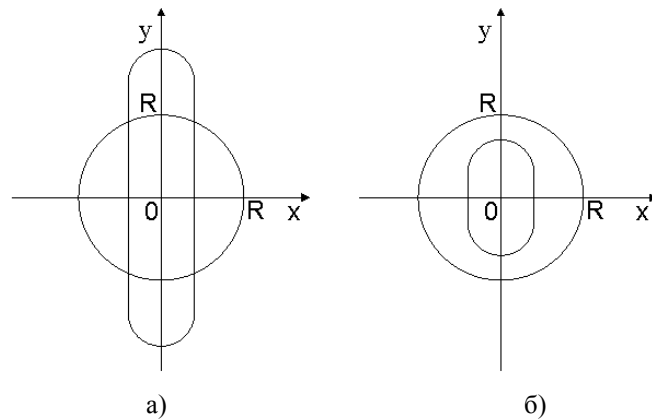


Рис. 2. Сканування лазерним променем десятитактного (а) та чотиритактного (б) сигналів

У першому випадку глибина піта буде змінюватися тільки вздовж координати  $x$  і може бути представлена у вигляді:

$$f(x) = 1 - \left( 1 - e^{-\frac{x^2}{b^2}} \right)^M, \quad (4)$$

де  $b$  і  $M$  — параметри, які залежать від способу виготовлення носія. На рис. 3 зображено профілі інформаційних пітів на поверхні оптичного носія.

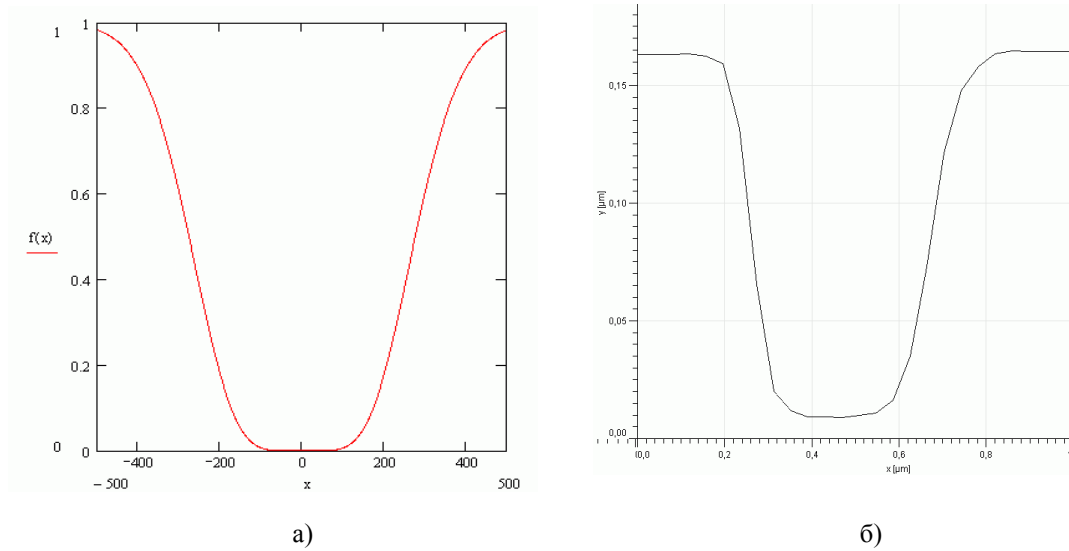


Рис. 3. Профілі заглиблень на поверхні оптичного носія: а) теоретично розрахований ( $b = 220$  нм та  $M = 3$ ); б) отриманий експериментально та виміряний на атомно-силовому мікроскопі

У такому випадку залежність сигналу відтворення має вигляд:

$$I(h) = a \left[ \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2 - y^2}} e^{-\frac{x^2 + y^2}{r^2}} \cdot \cos \left( \frac{4\pi n}{\lambda} h \cdot \left( 1 - \left( 1 - e^{-\frac{x^2}{b^2}} \right)^M \right) \right) dy dx \right]^2, \quad (5)$$

де  $a = 16Fc^2i_0^2$ .

У випадку, коли діаметр зони опромінення перевищує довжину піта (рис. 2б), необхідно ввести додаткову функцію  $f_p(y)$ , що буде моделювати зміну глибини піта вздовж координати  $y$ . Розглянемо трьохтактний піт, довжина якого може становити від 833 нм до 972 нм [6]. У такому випадку функція  $f_p(y)$  буде мати такий вигляд:

$$f_p(y) = 1 - \left( 1 - e^{-\frac{x^2}{9 \cdot 10^4}} \right)^{10}. \quad (6)$$

Таким чином, форма піта буде описуватися функцією

$$f(x) = \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\frac{x^2}{b^2}} \right)^M \right] \cdot \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\frac{x^2}{9 \cdot 10^4}} \right)^{10} \right], \quad (7)$$

та для лазерного променя піт буде бачитись як виступ (рис. 4а). Залежність сигналу відтворення трьохтактного піта від його глибини можна представити виразом:

$$I_p(h) = a \left[ \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2-y^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{r^2}} \cdot \cos \left( \frac{4\pi n}{\lambda} h \cdot \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\frac{x^2}{b^2}} \right)^M \right] \cdot \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\frac{x^2}{9 \cdot 10^4}} \right)^{10} \right] \right) dy dx \right]^2 \quad (8)$$

Довжина трьохтактного ленту також менша за діаметр опромінені зони. Його форму можна описати схожою функцією, тривимірний вигляд якої зображено на рис. 4б:

$$f(x) = \left[ 1 - \left( 1 - e^{-\frac{x^2}{b^2}} \right)^M \right] \cdot \left( 1 - e^{-\frac{x^2}{9 \cdot 10^4}} \right)^{10} \quad (9)$$

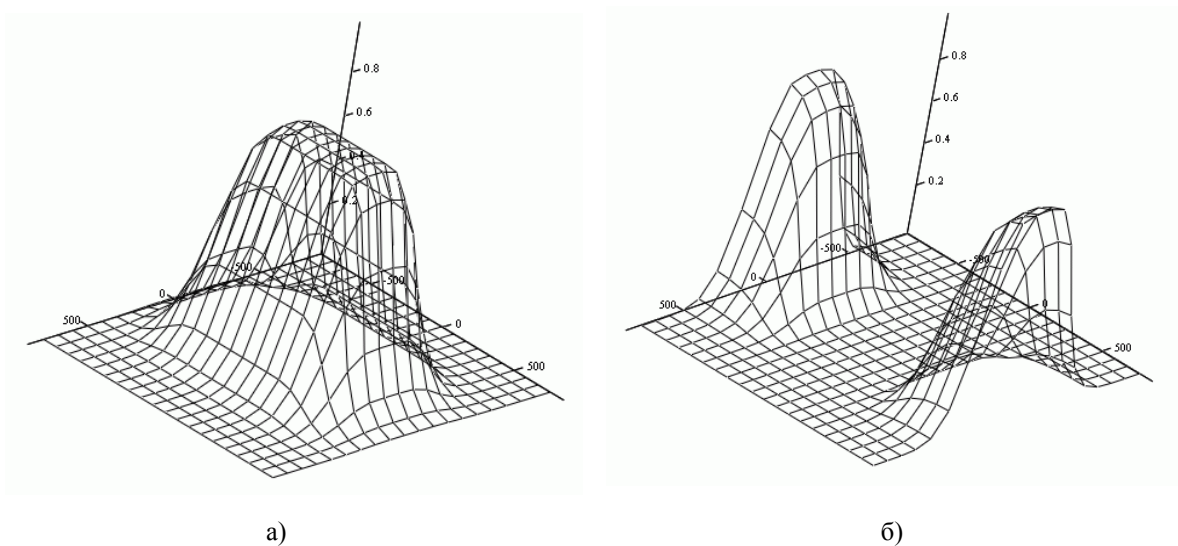


Рис. 4. Змодельована форма трьохтактного піту (а) та ленту (б)

У такому випадку залежність сигналу відтворення трьохтактного ленту від його глибини  $h$  описується наступним виразом і показана на рис. 5:

$$I_l(h) = a \left( \int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2-y^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{b_s^2}} \cdot \cos \left( \frac{4\pi n}{\lambda} h \cdot \left( 1 - \left( 1 - e^{-\frac{x^2}{b^2}} \right)^M \right) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{y^2}{9 \cdot 10^4}} \right)^{10} \right) dy dx \right)^2 \quad (10)$$

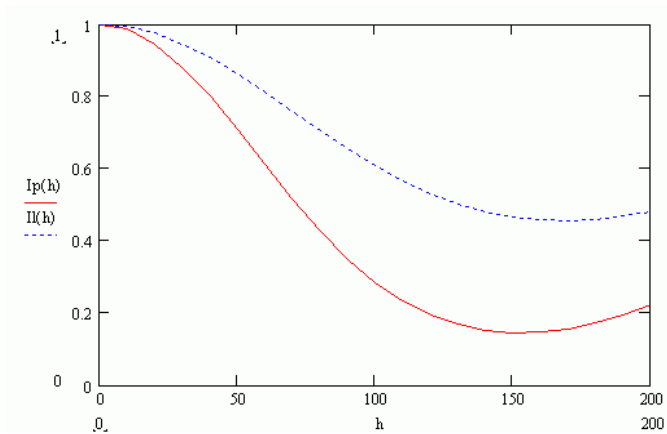


Рис. 5. Залежність сигналу відтворення трьохтактного піла  $I_p(h)$  та трьохтактного лєнду  $I_l(h)$  від глибини

### Визначення значення глибини пітів відповідно до стандарту CD

Для аналізу відтвореного сигналу з оптичного носія, крім змодельованих вище сигналів, необхідно визначити такі основні його параметри як: відносна амплітуда сигналу відтворення найдовшого (одинадцятитактного) піла  $K_{11}$ ; відносна амплітуда сигналу відтворення найкоротшого (трьохтактного) піла  $K_3$ ; асиметрія сигналу  $K_A$ . Для того, щоб розроблений носій відтворювався на стандартному плеєрі, необхідно щоб ці параметри відповідали наступним умовам [7]:

- 1)  $K_{11} \geq 0,6$ ;
- 2)  $0,3 \leq K_3 \leq 0,7$ ;
- 3)  $-0,2 \leq K_A \leq 0,2$ .

Визначимо залежність цих параметрів від значення глибини пітів. Відносні значення амплітуд сигналів відтворення одинадцятитактного та трьохтактного імпульсів можна виразити відповідно:

$$K_{11}(h) = \frac{I_{11}(h)}{I_{top}} = \frac{I(0) - I(h)}{I(0)}, \quad (11)$$

$$K_3(h) = \frac{I_3(h)}{I_{top}} = \frac{I_l(h) - I_p(h)}{I(0)}. \quad (12)$$

Залежність асиметрії відтвореного сигналу  $K_A(h)$  описується виразом:

$$K_A(h) = \frac{1}{2} - \frac{I_D(h)}{I_{11}(h)} = \frac{1}{2} - \frac{\frac{I_l(h) + I_p(h)}{2} - I(h)}{I(0) - I(h)}. \quad (13)$$

З графіків теоретичної залежності відносних амплітуд сигналів відтворення одинадцятитактного та трьохтактного імпульсів (рис. 6) видно, що для оптичного носія, виготовленого з полікарбонату, сигнал відтворення трьохтактного імпульсу набуває свого максимального значення при глибині  $h$ , що дорівнює 120 нм, яка

саме й рекомендується при виготовленні компакт-дисків. До того ж, аналіз наведеної залежності показує, що для коректного відтворення записаних даних з оптичного носія необхідно, щоб глибина пітів знаходилась у межах від 90 нм до 170 нм. Аналіз залежності асиметрії сигналу відтворення, розрахованої для підкладок, виготовлених із різних матеріалів (полікарбонат, кварцове скло, сапфір), додатково обмежує максимальне значення глибини пітів (рис. 7).

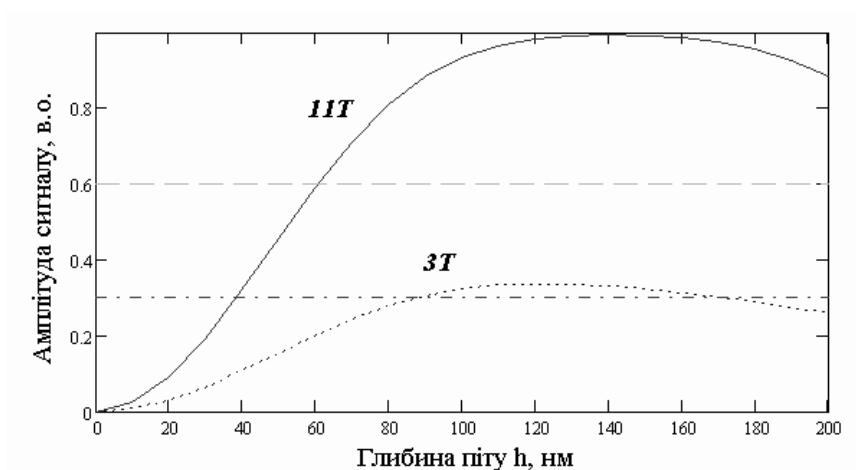


Рис. 6. Теоретичні залежності відносних амплітуд сигналів відтворення одинадцятитактного ( $K_{11}$ ) та трьохтактного ( $K_3$ ) імпульсів від глибини пітів  $h$

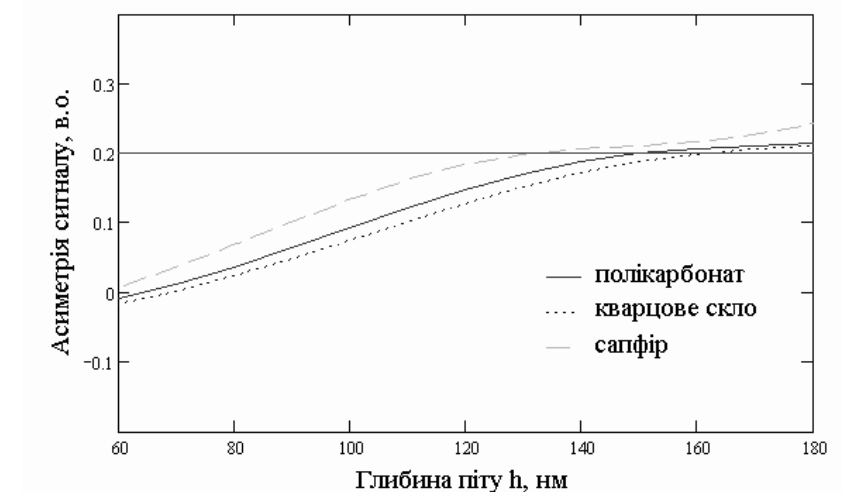


Рис. 7. Теоретична залежність асиметрії сигналу відтворення, розрахованої для підкладок з різних матеріалів

Аналогічні розрахунки були проведені для силікатного та кварцового скла, ситалу та сапфіру, що дозволило визначити такі значення глибини пітів (див. таблицю) для цих матеріалів, при яких розроблений оптичний носій для довготермінового зберігання даних буде відповідати формату стандартного компакт-диска і,

таким чином, відтворюватися на існуючих програвачах оптичних дисків (CD, DVD, BD). Експериментальні дослідження компакт-дисків, виготовлених з силікатного скла, відтворювалися на серійному програвачі компакт-дисків при значеннях глибини пітів від 100 до 150 нм.

Глибина пітів для різних матеріалів підкладки відповідно до стандарту CD

Матеріал	Показник заломлення	Глибина пітів
Полікарбонат	1,59	86–147 нм
Силікатне скло	1,51	90–155 нм
Ситал	1,55	88–151 нм
Кварцове скло	1,46	94–160 нм
Сапфір	1,77	77–132 нм

Крім того, за графіком залежності асиметрії сигналу (рис. 7) також можна визначити глибину пітів, встановивши значення асиметрії. Експериментальні дослідження дисків із різною глибиною пітів на приводі Plextor PX-712A показали можливість такого контролю.

## Висновки

Наведена модель дозволяє якісно прослідкувати залежність від глибини пітів таких основних параметрів сигналу відтворення оптичного носія, як відносна амплітуда сигналів відтворення трьохтактного та одинадцятитактного пітів, та асиметрії сигналу, що дозволяє визначити значення глибини пітів для різних матеріалів підкладки відповідно до формату компакт-дисків. Крім того, розроблена модель показує можливість визначення глибини отриманих пітів на поверхні прозорої підкладки за параметрами електронного сигналу відтворення, які можуть бути визначені за допомогою стандартного обладнання, що використовується для контролю якості звичайних компакт-дисків при їхньому серійному виробництві.

1. Металеві носії для довготермінового зберігання інформації / [В.В. Петров, А.А. Крючин, С.М. Шанойло та ін.]. — К.: Наук. думка, 2005. — 132 с.
2. Горбов І.В. Оптичні дискові носії для довготермінового зберігання даних / І.В. Горбов, В.О. Беляковський // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2007. — Т. 9, № 3. — С. 73–87.
3. Seehausen G. Influence of Pit Geometry on Readout Signals of Optical Data Disc Drives / G. Seehausen // Electronics Letters. — 1992. — Vol. 28, N 18. — P. 1709–1711.
4. Effect of Edge Rounding and Sloping on the Readout Signal of the Information Pits on Optical Disks / Y. Li, H. Lee, E. Wolf // Optical Engineering. — 2003. — Vol. 42, N 9. — P. 2707–2720.
5. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. С.Н. Бреуса, А.И. Головашкина, А.А. Шубина. — М.: Наука, 1973. — 720 с.
6. Pohlmann K.C. The Compact Disk Handbook / Ken C. Pohlmann. — Madison, 1992. — 352 p.
7. ISO/IEC 10149:1995 (E). Information Eechnology — Data Interchange on Read-Only 120 mm Optical Data Disks (CD-ROM). — 1995. — 40 p.

Надійшла до редакції 06.03.2009