

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

С. М. Цирульник, В. П. Кожем'яко, Г. Л. Лисенко

**АРХІТЕКТУРА  
ДИНАМІЧНИХ ОПТИЧНИХ  
ОПЕРАТИВНИХ ЗАПАМ'ЯТОВУВАЛЬНИХ  
ПРИСТРОЇВ НА ВОЛОКОННО-  
ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ**

**МОНОГРАФІЯ**

Вінниця  
ВНТУ  
2009

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/484>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 004.33:681.7

ББК 32.973.2

Ц 71

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 26.02.2009 р.)

Рецензенти:

**Г. С. Тимчик**, доктор технічних наук, професор

**В. М. Дубовой**, доктор технічних наук, професор

**Цирульник, С. М.**

Ц 71 Архітектура динамічних оптичних оперативних запам'ятовувальних пристроїв на волоконно-оптичних лініях : монографія / С. М. Цирульник, В. П. Кожем'яко, Г. Л. Лисенко. — Вінниця : ВНТУ, 2009. — 187 с.

ISBN 978-966-641-328-7

Розглядаються принципи побудови динамічних оптичних оперативних запам'ятовувальних пристроїв на волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ) та організації структур систем оптичної пам'яті. Розроблено способи адресації та розміщення інформації в пам'яті на ВОЛЗ. Наводяться способи представлення інформаційних блоків, способи відображення логічних адрес інформаційних блоків на фізичні адреси динамічних оптичних оперативних запам'ятовувальних пристроїв на ВОЛЗ і запропоновано особливості їх застосування при проектуванні нових типів оптоелектронних приладів та систем.

**УДК 004.33:681.7**

**ББК 32.973.2**

**ISBN 978-966-641-328-7**

© С. Цирульник, В. Кожем'яко, Г. Лисенко, 2009

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/484>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ</b> .....	5
<b>ПЕРЕДМОВА</b> .....	7
<b>ВСТУП</b> .....	9
<b>РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ЗАПАМ'ЯТОВУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ</b>	
1.1 Аналіз сучасного стану методів побудови технічних засобів пам'яті .....	10
1.2 Класифікація методів і структур зберігання інформації .....	29
1.3 Оцінювання продуктивності систем пам'яті інформаційно- обчислювальних систем .....	38
1.4 Проблеми підвищення швидкодії та шляхи їх вирішення .....	44
<b>РОЗДІЛ 2 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ОПТИЧНОГО ОПЕРАТИВНОГО ЗАПАМ'ЯТОВУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ</b>	
2.1 Модель структури пам'яті на лініях затримки .....	47
2.2 Принципи побудови оптичного оперативного запам'ятовувального пристрою .....	51
2.2.1 Динамічний оптичний оперативний запам'ятовувальний пристрій на волоконно-оптичних лініях ..	52
2.2.2 Фізичні характеристики базового елемента динамічної оптичної пам'яті .....	63
2.2.3 Регенерація даних у динамічному оптичному оперативному запам'ятовувальному пристрої .....	69
2.3 Математичне моделювання процесів у динамічному оптичному оперативному запам'ятовувальному пристрої .....	71
2.4 Аналіз світлової енергетичної ефективності .....	81
2.5 Експериментальні характеристики та параметри оптичної пам'яті на волоконно-оптичних лініях .....	83
<b>РОЗДІЛ 3 ОРГАНІЗАЦІЯ ПАМ'ЯТІ В ОПТИЧНИХ СТРУКТУРАХ</b>	
3.1 Організація багаторівневої пам'яті .....	89
3.2 Структури динамічної оптичної пам'яті на волоконно-оптичних лініях .....	94
3.3 Розробка методів адресації та розміщення інформації в пам'яті на волоконно-оптичних лініях .....	105

3.4 Аналіз ефективності динамічного оптичного оперативного запам'ятовувального пристрою.....	119
<b>РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНОГО ОПТИЧНОГО ОПЕРАТИВНОГО ЗАПАМ'ЯТОВУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ</b>	
4.1 Перетворювачі кодів на динамічному оптичному запам'ятовувальному пристрої .....	124
4.1.1 Регістр зсуву .....	124
4.1.2 Перетворювач послідовного коду в паралельний .....	126
4.1.3 Перетворювач паралельного коду в послідовний .....	127
4.1.4 Комутатор TDM .....	128
4.2 Двоопераційна буферизація на динамічному оптичному запам'ятовувальному пристрої .....	130
4.3 Системи підготовки та сортування даних інформаційно-обчислювальних систем на динамічному оптичному запам'ятовувальному пристрої .....	135
4.4 Перспективи застосування логіко-часового оптоелектронного процесора .....	140
4.5 Фізико-технологічні основи створення наноструктур пам'яті.....	144
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	154
<b>ЛІТЕРАТУРА</b> .....	156

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

DRAM	Dynamic RAM
EDFA	Ербієвий волоконний підсилювач
FIFO	First In — First Out
LRA	Рамановський волоконний підсилювач
LIFO	Last In — First Out
RAM	Random Access Memory
ROM	Read-Only Memory
SOA	Напівпровідниковий оптичний підсилювач
SRAM	Static RAM
TDM	Технологія мультимплексування каналів з розподілом часу
БЗП	Буферний запам'ятовувальний пристрій
БП	Біопроцесор
ВЗ	Вхід запису
ВІС	Великі інтегральні схеми
ВК	Вхід керування
ВОЛ	Волоконно-оптична лінія
ВОЛЗ	Волоконно-оптична лінія зв'язку
ВОС	Волоконно-оптична структура
ВЧ	Вхід читання
ГБТ	Гетеробіполярний транзистор
ГІС	Геоінформаційна система
ГЕС	Геоінформаційно-енергетична система
ГМКМ	Горизонтальні багатокристалльні модулі
ДЗП	Динамічний запам'ятовувальний пристрій
ДООЗП	Динамічний оптичний оперативний запам'ятовувальний пристрій
ДП	Двонаправлений перемикач
ЕП	Елемент пам'яті
ЗП	Запам'ятовувальний пристрій
ЗПДВ	Запам'ятовувальний пристрій з довільною вибіркою
ЛД	Лазерний діод
ЛЧК	Логіко-часовий код
ЛЧС	Логіко-часове середовище

ЛЧФ	Логіко-часова функція
НВ	Направлений відгалужувач
НВІС	Надвеликі інтегральні схеми
НВЕТ	Транзистор з високою рухливістю електронів
НР	Накопичувальний регістр
НХВ	Направлений хвилеводний відгалужувач
ОБЕ	Оптичний бістабільний елемент
ОМ	Обчислювальна машина
ООЗП	Оптичний оперативний запам'ятовувальний пристрій
ООМ	Оптоелектронна обчислювальна машина
ОП	Обмінний перемикач
ОХ	Оптичний хвилевід
ПЗЗ	Прилад із зарядовим зв'язком
ПЗП	Постійний запам'ятовувальний пристрій
ПОМ	Передавальний оптичний модуль
Р/П	Реплікатор / перемикач
СП	Система пам'яті
СД	Світлодіод
СХ	Смушковий хвилевід
ТМС	Тривимірні мікроскладання
ФП	Фотоприймач
ФПМ	Фотоприймальний модуль

## ПЕРЕДМОВА

Існуючі методи проектування традиційних алгоритмів і архітектура ЕОМ уже не відповідають тим алгоритмічним і архітектурним рішенням, до яких приходять при розробці обчислювальних структур із високим ступенем паралелізму.

Найбільш критичними є елементи динамічної пам'яті, мікропроцесори, спеціальні надвеликі інтегральні схеми.

Використання електромагнітних коливань оптичного діапазону відкриває нові шляхи побудови надшвидкодійних обчислювальних структур, у яких, шляхом нормування часових затримок на волоконно-оптичних лініях (ВОЛ), часовий зсув імітує виконання найпростіших арифметичних і логічних операцій із швидкістю близькою до швидкості світла.

Синтез і аналіз зображень у теперішній час в основному реалізується за допомогою алгоритмічної обробки на ПК. У зв'язку з тим, що зображення стають масовою продукцією в промисловості і науці, а їх обробка, розпізнавання й аналіз – масовим потоковим виробництвом, – цифрова обробка зображень стає економічно вигідною і необхідною скрізь, де вона технічно можлива [1, 25, 82].

Вирішення проблем обробки і перетворення великих масивів інформації шляхом застосування класичних прийомів програмного керування виявляється важким, особливо при введенні і виведенні зображень у ситуаціях, що швидко змінюються.

Традиційно інформаційне поле подається в ЕОМ двома способами – поелементним і табличним. Оскільки адресація в більшості машин послідовна, то дані, що знаходяться в пам'яті, упорядковані абсолютними значеннями адрес. Тому будь-який масив, що знаходиться в пам'яті, «розгорнутий» в одновимірну послідовність елементів, змінює вихідну топологію масиву. Особливістю доступу до відеоданих є необхідність вибірки з пам'яті пов'язаних фрагментів зображень або елементів однакової текстури. Після розгортки масиву ці елементи швидше за все виявляються в комірках, адреси яких значно відрізняються. Тому час обробки істотно залежить від того, чи знаходиться весь масив у ОЗП, де доступ до комірки довільний, чи частина масиву знаходиться в зовнішній пам'яті ЕОМ, час доступу до якої на декілька порядків вищий від часу звертання до ОЗП. Тому спосіб розгортки масиву робить істотний вплив на час обробки. Таким чином, спосіб організації, збереження і пошуку елемента багатовимірного масиву повинний забезпечувати найбільшу ймовірність виявлення сусідніх елементів масиву або просторово-зв'язаних елементів, або елементів однакової текстури на одній і тій же сторінці пам'яті. Крім організації

збереження суттєвим є об'єм пам'яті. Так для високоякісної обробки зображення потрібні масиви не менше  $4096 \times 4096 \times 16$  елементів, для яких об'єм ОЗП повинен складати для мультимедійної обробки – 200 Мбайт [53]. Тому актуальним є створення таких структур пам'яті, у яких зберігання інформації про топологію і текстуру інформаційного поля відповідає суттєвому (на порядок) скороченню об'єму пам'яті.

База даних зображень і образів у спеціалізованих відеокомп'ютерах повинна складати біля 100000 елементів зображень. Вибірка даних повинна проводитись в середньому за 100 мс [39], тобто еквівалентна продуктивність складає 1 млн. образів/с. З огляду на те, що образи мають від  $5000 \times 5000$  до  $10000 \times 10000$  елементів, продуктивність повинна складати від  $2,5 \cdot 10^{13}$  до  $10^{14}$  елементарних операцій у секунду. У зв'язку з цим, стає очевидним, що існуючі методи і способи обробки зображень найближчим часом не в змозі задовольнити зазначені потреби і потребують принципово нових підходів до обробки зображень.

Актуальність робіт у цій області обумовлена необхідністю дослідження нових можливостей побудови, організації оптичних запам'ятовувальних пристроїв в нових засобах інформаційної та обчислювальної техніки.

Покращити технічні характеристики та розширити область застосування пристроїв з пам'яттю можна застосовуючи у нових оптико-електронних системах динамічну оптикоелектронну пам'ять на волоконно-оптичних лініях. Використання новітніх оптико-електронних технологій також сприяє переходу до нанотехнологічної реалізації багатопроцесорних систем, зокрема в системах масового використання та геоінформаційно-енергетичних системах керування.

Необхідність створення і впровадження процесорів з динамічною пам'яттю на ВОЛ зумовлена також дослідженнями Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України за держбюджетною темою: «Оптико-електронний квантоворозмірний образний комп'ютер око-процесорного типу: концепції, методологія, база знань» (№ держреєстрації: 0105U002434).

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників у галузі оптичних інформаційних систем, око-процесорних систем, систем паралельної обробки інформації, а також на студентів і аспірантів відповідних спеціальностей.

Вступ, висновки, а також підрозділи 1.3, 2.3, 3.1, 4.2, 4.5 підготував В. П. Кожем'яко; підрозділи 2.1, 3.2, 4.1 – Г. Л. Лисенко; підрозділи 1.1, 1.2, 1.4, 2.2, 2.4, 2.5, 3.3, 3.4, 4.3, 4.4 – С. М. Цирульник.



## ВСТУП

Інформаційно-обчислювальна техніка підійшла до того критичного моменту, коли теоретичні і прикладні дослідження зробили очевидним обмеження в застосуванні для розв'язання цілого ряду задач послідовно-потоківих арифметичних операцій в ЕОМ перших п'яти поколінь. Для паралельної обробки інформації стала очевидною неспроможність орієнтації тільки на концепцію еволюційного удосконалення комп'ютерної та мікропроцесорної техніки.

Постійно зростаючі вимоги до обробки сигналів у реальному часі і до підвищення швидкодії апаратури приводять до необхідності створення обчислювальних структур із новою архітектурою, спроможних із дуже великою швидкістю обробляти величезні масиви даних.

Збільшення продуктивності інформаційно-обчислювальних систем досягається за рахунок підвищення тактової частоти логічних елементів та елементів пам'яті, а також їх кількості. Для кожного рівня розвитку елементної бази існує обмеження значення тактової частоти й кількості елементів. До числа обмежень відносяться також завжди існуючий розрив між швидкодією логічних елементів та елементів пам'яті. Цей розрив має тенденцію до збільшення при зростанні ступеня інтеграції й швидкодії елементної бази.

Оскільки електронні пристрої впритул наблизилися до своєї фізичної межі швидкодії, розв'язання задач паралельної обробки інформації, зокрема, обробки зображень у реальному часі, цілком залежить від розробки високошвидкісних і цілком паралельних інтелектуально-обчислювальних процесів, алгоритми роботи й архітектура яких орієнтована на нейроподібні принципи обробки і перетворення інформації

Розвиток процесорних технологій в останні роки виявив вузьке місце сучасних комп'ютерних архітектур – оперативну пам'ять. Якщо зовсім недавно основною причиною низької продуктивності серверів та систем високопродуктивних обчислень були підсистеми введення/виведення, то сьогодні на перший план вийшло відставання продуктивності доступу до пам'яті від продуктивності сучасних процесорів. Розробники процесорних систем використовують різні підходи для подолання цієї проблеми. Тому розробка швидкодійної оптичної пам'яті є актуальною задачею.

Саме ці питання і є пріоритетними у монографії. Робота направлена на покращення технічних характеристик систем пам'яті: підвищення їх швидкодії за рахунок використання нових тенденцій у розвитку волоконно-оптичних технологій.

# РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОБЛЕМИ ПОБУДОВИ ЗАПАМ'ЯТОВУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

## 1.1 Аналіз сучасного стану методів побудови технічних засобів пам'яті

На сьогодні існують три основні технології технічної реалізації засобів пам'яті – магнітні, твердотільні, оптичні. За прогнозами спеціалістів у найближчі 5 років жорсткі диски, як і раніше, залишаться основними пристроями для зберігання великих обсягів інформації.

Сучасні технології читання/запису на магнітних дисках базуються на використанні тонких квантових ефектів, таких як взаємодія спину електрона з магнітним полем і магнітного тунельного переходу. Ці явища лежать в основі створення клапанів спинів, в яких спостерігається так звана гігантська магніторезистивність (GMR – Giant Magneto Resistance). Зменшити розмір зони запису біта (суперпарамагнітна межа) можна за допомогою технології перпендикулярного запису [10].

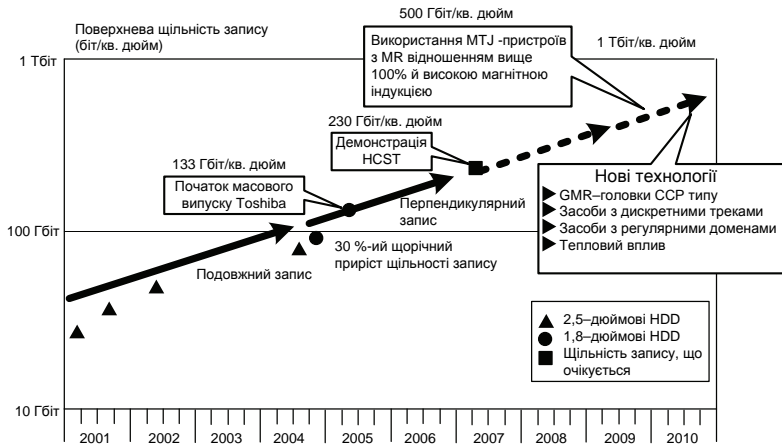


Рис. 1.1 – Перспективи розвитку перпендикулярного запису

Сьогодні найвища щільність запису в комерційно доступних продуктах складає 133 Гбіт/кв. дюйм (рис. 1.1). Якщо такий темп збережеться, то до 2010 р. вона досягне значення 0,5 Тбіт/кв. дюйм. Це значить, що на пластині 3,5 дюйма можна буде помістити 750 Гбайт даних [42].

Flash-пам'ять відома і широко застосовується досить давно. З приходом ери мобільності Flash-пам'ять знайшла друге дихання. Індустрія незалежної пам'яті з величезним прискоренням наближається до межі своїх можливостей, тому вже сьогодні всі без винятку крупні виробники flash-пам'яті включилися в гонку технологій.

Основним елементом flash-комірки є транзистор з плаваючим затвором. Детальніше познайомитися з особливостями flash-пам'яті можна в [42, 103]. Основними сучасними технологіями flash-пам'яті є: MirrorBit (NROM), Ovonix Unified Memory, фероелектрична (FRAM), магніторезистивна (MRAM), Direct Tunneling Memory (DTM), нанокристалічна [42]. Представити перспективи розвитку напівпровідникових технологій можна згідно з характеристиками наведеними в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

План розвитку напівпровідникових технологій

Рік	2002	2003	2004	2005	2008	2011	2014
Масштаб (half-pitch), нм	130	120	110	100	70	50	35
Мінімальна робоча напруга Vdd, В	1,2	1,2	0,9	0,9	0,6	0,5	0,3
Комірка DRAM, кв. мкм	0,1	0,08	0,07	0,044	0,018	0,008	0,003
Час збереження DRAM, мс	250	250	250	500	500	500	500
Час зберігання енергонезалежного ЗП, років	10	10	10	10	10	10	10
Максимальна кількість циклів перезапису	100 тис.	100 тис.	100 тис.	100 тис.	100 тис.	1 млн.	1 млн.
Вартість (цент/біт)	17	11	8	5,3	1,9	0,6	0,2

Поступаючись магнітним носіям у щільності запису й швидкодії ресстрації інформації, оптичні носії інформації знайшли своє місце у інформаційних технологіях як ефективний технічний засіб масового розповсюдження інформації та її архівного зберігання. Оптичні носії інформації привертають увагу до себе завдяки як високій надійності зберігання інформації і зручності їх експлуатації, так і досить великій інформаційній ємності. Поява оптичних носіїв з можливістю перезапису інформації фактично привела до технологічної революції у галузі змінних носіїв.

Будь-який оптичний диск містить інформацію у вигляді темних і світлих ділянок на дзеркальній поверхні, захищеній шаром полікарбонату. Нанести їх можна різними способами: надрукувати за допомогою фотолітографії, як в штампованих дисках, випалити лазером, як в DVD+/-R або CD-R дисках, або змінити прозорість самого полікарбонату, як в DVD+/-RW або CD-RW. Щільність запису на диск визначається мінімальним розміром точки. Підвищення щільності запису інформації в оптичних запам'ятовувальних пристроях досягається в основному за рахунок зменшення довжини хвилі лазерного випромінювання, підвищення роздільної здатності оптичної системи, використання ефективніших систем подання інформації [14, 16, 17, 75].

Оптичні носії CD, DVD базуються на червоних лазерах з довжиною хвилі 789 і 650 нм, відповідно. Щоб збільшити ємність диска, але зберегти його невеликий розмір, необхідно застосовувати короткохвильові лазери. Нові стандарти – Blu-ray і HD DVD – передбачають перехід на випромінювання з довжиною хвилі 405 нм (табл. 1.2), що знаходиться в блакитному секторі спектра.

Таблиця 1.2

Параметри різних стандартів CD і DVD

Параметри	DVD	HD-DVD	BD	CD	FMD	VCDHD	VMD-ROM	SVOD
Ємність на шар, Гбайт	4,7	15	25	0,7	4,2	4,7	5	9,4
Товщина диску, мм	0,6+0,6	0,6+0,6	1,1+0,1	0,6+0,11	0,6+2,75	0,6	0,6	0,092
Кількість шарів (на кожній стороні)	2	2	2	1	12	1	20	100
Довжина хвилі лазера, нм	650	405	405	780	532	650	650	650
Цифрова апертура	0,6	0,65	0,85	0,45		0,6	0,6	
Необхідність в картриджі	Ні	Ні	Ні/Так	Ні	Ні	Ні	Ні	Так
Необхідність у контролі нахилу диска	Ні	Так	Ні/Так	Ні	Ні	Ні	Ні	

Специфікація HD DVD-ROM у версії 1.0 з'явилась у червні 2004 року [17, 69]. Диски HD DVD-ROM мають ємність 15 Гбайт на шар, таким чином односторонній двошаровий носій здатний вміщати 30 Гбайт. Такі ж показники мають заготовки HD DVD-R і HD DVD-R DL. Зате перезаписувані HD DVD-RW дозволяють зберігати 20 Гбайт на одній стороні. Розробку сімейства специфікацій HD DVD ведуть спільно NEC і Toshiba. Його найважливішою перевагою є те, що в дисках використовується захисний шар товщиною 0,6 мм, такий же, як і в звичайних DVD. Завдяки цьому оптична система головки HD DVD майже не відрізняється від DVD, тобто простіше забезпечити сумісність нових приводів з носіями обох типів. HD DVD підтримує цілий ряд голлівудських студій, включаючи Paramount Pictures, Universal Pictures, New Line Cinema і Warner Brosers Studios.

Прихильників формату Blu-ray Disc (BD) значно більше. В їх числі такі крупні фірми, як Dell, Hitachi, HP, LG, JVC, Matsushita, Mitsubishi, Pioneer, Philips, Samsung, Sharp, Sony, Thomson, TDK, що утворили раду директорів Blu-ray Disc Association (BDA). Згідно з офіційним сайтом BDA [72], асоціацією була затверджена специфікація BD-ROM версії 1.0. Відповідно до цього документа ємність одного шару складає 25 Гбайт, а двох – 50 Гбайт, що значно більше, ніж у носіїв HD DVD. Друга важлива відмінність BD від попередників полягає в тому, що захисний шар високоємних дисків, під яким ховається реєструюча плівка, значно тонший – всього 0,1 мм. Через це оптична головка приводів Blu-ray влаштована складніше, адже для забезпечення сумісності з DVD і CD доводиться вдаватися до хитрощів щодо зміни фокусної відстані і довжини хвилі. Наприклад, Sony створила оригінальний лазер, здатний випромінювати на трьох довжинах хвиль. В дослідній лабораторії Matsushita Electric Industrial була сконструйована оптична головка на базі дифракційного елемента, яка дозволяє розщепити початковий сигнал на три складові, причому підсумкової потужності цілком достатньо для запису BD і DVD. Ще одне цікаве рішення запропонували фахівці LG Electronics. Їх оптичний тракт оснований на єдиній асферичній об'єктній лінзі і новому поляризаційному голографічному пристрої [17, 42, 114].

До переваг BD, окрім великої ємності, можна віднести і перспективність цієї розробки. Незабаром Sony готується представити чотиришарові диски Blu-ray, а згодом ще раз подвоїти кількість шарів.

Компанія Iomega може стати третьою на ринку оптичних носіїв. Iomega одержала патент № 6879556 «Методика і апаратні рішення для оптичних накопичувачів» (Method and Apparatus for Optical Data Storage), який описує новий підхід до зберігання інформації на оптичних дисках [17, 42]. Ключова ідея розробленої фахівцями Iomega технології AO-DVD (Articulated Optical Digital Versatile Disc) полягає у використанні багат шарових структур відбиваючі елементи в яких розташовані під різними кутами до поверхні диска. Основна складність тут полягає в тому, щоб розрахувати, крізь яку послідовність поверхонь, що мають різний кут нахилу, пройшов лазерний промінь. Проте у разі успішного розв'язання згаданої задачі щільність запису інформації на оптичному диску вдасться збільшити в багато разів. Як стверджує Iomega, в перспективі можна говорити про 40–100-кратне зростання ємності порівняно з нинішніми DVD – тобто приблизно до 800 Гбайт. Причому цим справа не обмежується – додатково відкривається можливість підвищити швидкість передачі даних в 5–30 разів. Дуже важливий і такий факт: згідно із заявами представників компанії значного зростання витрат при переході на нову технологію не буде.

Один з варіантів нової технології, можливість практичного впровадження якого зараз оцінюють фахівці фірми Iomega, одержав назву NG-DVD (Nano-Grating DVD). Він передбачає використання структури, яка нагадує кристалічну ґратку, у вузлах якої знаходяться відбиваючі елементи-комірки. Для запису і зчитування інформації передбачається задіяти декілька механізмів, включаючи віддзеркалення, поляризацію, зміну фази променя.

Конкурентом Blue-Ray DVD є багат шарові флуоресцентні диски для телебачення високої чіткості компанії C3D Inc [14, 17].

Компанією Constellation 3D (C3D) був продемонстрований новий формат – FMD (Fluorescent Multilayer Disk), який вже скоро може стати новим лідером [14, 17]. Першим поколінням дискових продуктів компанії C3D стане сімейство 120 мм багат шарових FM-дисків з ємністю до 140 Гбайт і із швидкістю читання до 1 Гбіт в секунду. FM-диск прозорий, ця технологія не має потреби у присутності відбиваючого шару. У носіях FMD не використовується відбитий промінь лазера, оскільки при дії лазерного променя на інформаційний шар останній сам починає випромінювати.

Принцип дії флуоресцентних дисків оснований на явищі фотохромізму. Російські хіміки відкрили стійкий органічний матеріал «стабільний фотохром», який під впливом лазерного променя, набуває флуоресцентних властивостей (флуоресцентне світіння). Інформаційний елемент FM-диска (фотохром) може змінювати свої фізичні властивості (колір або наявність флуоресценції) під впливом лазера певної потужності і довжини хвилі. При дії лазера великої потужності, ініціюється фотохімічна реакція, в результаті якої й починають проявлятися флуоресцентні властивості.

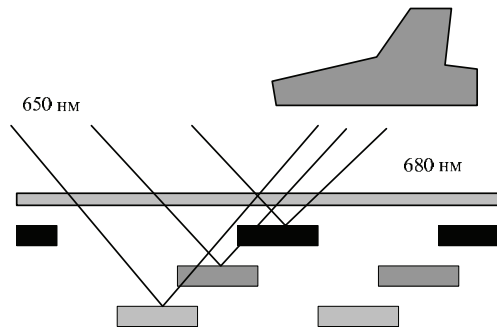


Рис. 1.2 – Принцип роботи FMD диска

При зчитуванні ця речовина знову ж таки збуджується, але за допомогою лазера меншої потужності, і починає флуоресцювати. Це світіння уловлюється фотоприймачем і приймається як значення «1». Збуджений фотохром випромінює світло, зсуваючи спектр випромінювання, що падає на нього, у бік червоного кольору на певну величину (в межах 30–50 нм), що дозволяє легко розрізнити сигнал лазера і світло, яке випромінюється матеріалом диска (рис. 1.2). Ця технологія дозволяє обійти проблему множинної інтерференції між шарами, яка може привести до втрати променя в багатошаровому диску, оскільки випромінюване фотохромом світло не когерентне і добре контрастує з відгалуженим лазером, вільно проходить крізь шари, і легко визначається фотодатчиком.

У разі флуоресцентних дисків таке погіршення сигналу при наростанні числа шарів відбувається набагато повільніше. За заявою розробників FMD-ROM, навіть якщо кількість шарів більша сотні не відбу-

ватиметься сильного спотворення корисного сигналу, оскільки всі шари диска прозорі і однорідні.

Диск складається з декількох полікарбонатних шарів, що з'єднані між собою (рис. 1.3). Шар містить поверхневі структури («піти»), які заповнюються флуоресцентним матеріалом. При зчитуванні лазер фокусується на певному шарі і світіння уловлюється фотодетектором. Розробники заявляють, що при використанні синього лазера (480 нм) можливе збільшення щільності запису до десятка Тбайт на один FM-диск.



Рис. 1.3 – Конструкція FMD-диска

Особливість цієї технології полягає в можливості паралельного зчитування (рис. 1.4). Якщо записувати послідовність біт не вздовж доріжки, а вглиб по шарах, то можна значно підвищити швидкість вибірки даних. Таким чином, з'являються три способи читання даних: послідовний, послідовно-паралельний і паралельний.

Процес зчитування відбувається за допомогою фоточутливого елемента, який представляє масив CDD камер. Цей прилад здатний зчитувати малопотужне світіння з частотою в декілька десятків МГц. При цьому швидкість зчитування досягає 1 Гбіт/с. Механічна швидкість роботи приводу в 450 разів менша ніж у DVD.

Розробники FMD-технології пропонують два принципи запису. Перший (термічний) – припускає використання матеріалу, що спочатку має флуоресцентну властивість (логічна одиниця), а після запису ділянки, на які здійснюється термічна дія за допомогою лазера, втрачають цю властивість (логічний нуль). Другий (хімічний) – використання матеріалу, який не має флуоресцентних властивостей. Під дією лазера відбувається фотохімічна реакція, в результаті якої матеріал



наділяється флуоресцентною властивістю. Для збудження цієї реакції досить малопотужного лазера або світлодіодної матриці. При використанні світлодіодної матриці можливий одночасний запис цілого масиву інформації, що прискорює процес запису.

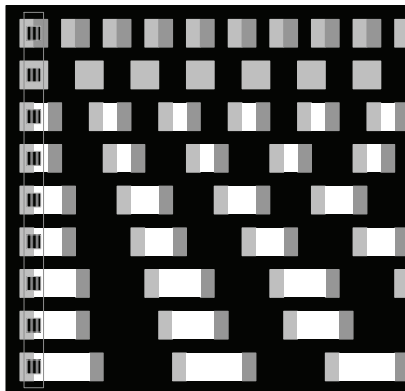


Рис. 1.4 – Паралельне зчитування. Збільшення зображення ділянки FMD, що отримане CDD камерами

VCDHD (Versatile Compact Disc High Density) – альтернатива DVD-дисків компанії «FortMedia», що відрізняється малою вагою – всього 8 г і товщиною – 0,7 мм [118]. Диски мають підвищену міцність на вигин, а їх робоча поверхня захищена спеціальними виступаючими борознами і лаком, що оберігають від подряпин. Це дозволяє класти диски на стіл, а також транспортувати їх в простих конвертах. VCDHD – новий оптичний носій, в якому поєднані позитивні риси традиційних DVD і CD дисків. У порівнянні з традиційними оптичними носіями інформації VCDHD мають такі переваги [64]:

- ємність до 4,7 Гбайт;
- надзвичайна гнучкість, яка досягається за рахунок зниження товщини диска до 0,6 мм проти 1,2 мм у традиційних носіїв;
- сумісність з сучасними програвачами;
- стійкість до механічних і температурних деформацій, а також до пошкодження інформаційної зони, що забезпечується за рахунок виконання носія на основі однієї підкладки, аналогічно CD, відсутність клейового шару, характерного для DVD, а також за рахунок кі-

льцевих виступів, що захищають дзеркальну поверхню диска від подряпин, через яку проводиться зчитування інформації;

- підвищена технологічність, яка досягається за рахунок істотного скорочення полікарбонату, необхідного для відливання одного диска, а також використання спеціального захисного лаку, який захищає диски від викривлення і деформацій у процесі їх виготовлення, що в сумі дозволяє скоротити цикл виробництва одного диска до 2 секунд проти 6–9 секунд для CD і DVD і при цьому знизити відсоток браку до 1 % проти 5–10 % у традиційних носіїв;

- адаптивність технології, яка дозволяє з порівняно невеликими витратами переобладнати лінії для виробництва традиційних носіїв під виробництво VCDHD.

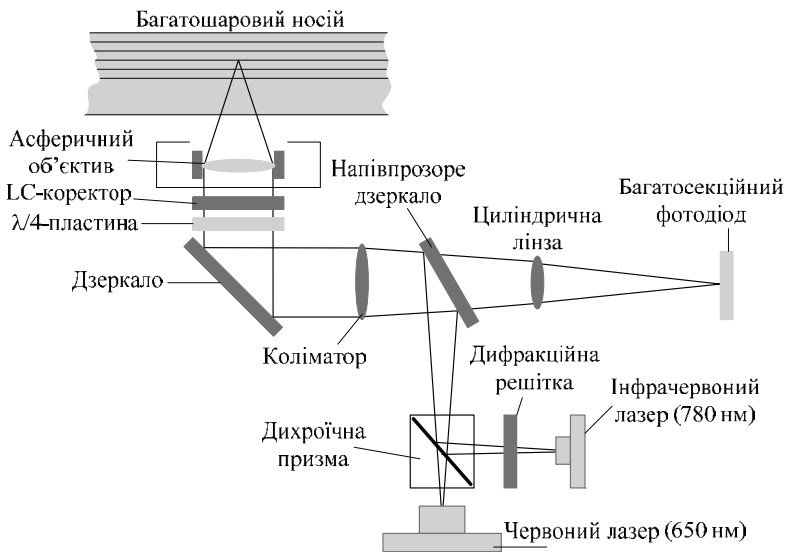


Рис. 1.5 – Оптична схема VMD-приводу

VMD-ROM (Versatile Multilayer Disk) – нова технологія виробництва і формат багатошарових компакт-дисків, що розроблена компаніями NME (New Medium Enterprises) і E-world на основі червоного лазера [6]. Не відмовляючись повністю від «технології червоного лазера», розробники NME знайшли спосіб використання незадіяного простору між існуючими шарами стандартного DVD за допомогою засто-

сування унікальної багатошарової технології. Це дозволило забезпечити меншу собівартість пристроїв відтворення у порівнянні з Blu-ray Disk і HD-DVD. VMD мають такі ж розміри, як і DVD. Товщина кожного шару, що формується на пластиковій підкладці, складає 20–30 мкм. За заявою розробників, кількість шарів на диску може бути до 20. Ємність запису на кожному шарі складає орієнтовно 5 Гбайт, що дозволить розміщувати до 100 і більш Гбайт інформації.

VMD привід практично аналогічний стандартному DVD приводу з деякими особливостями, що забезпечують можливість багатошарового зчитування (рис. 1.5). Приводи вбудовуються в VMD плеєри і комп'ютери, що робить можливим читання багатошарових дисків. Для виробництва VMD-ROM потрібні не значні зміни існуючого процесу виробництва. Технологія і виробниче устаткування залишаються без змін. Потрібне додаткове програмне забезпечення, що дозволяє зчитати інформацію між шарами.

SVOD (Stacked Volumetric Optical Disc) – багатошаровий оптичний диск, розроблений компанією Hitachi Maxell [7]. Конструкція диска відрізняється від VMD-ROM тим, що він є не монолітний багатошаровий, а збірний оптичний диск, що складається з безлічі дуже тонких (~92 мкм) окремих дисків. Діаметр диска залишився тим самим (120 мм). Прототип пристрою складався з 100 ультратонких DVD з сумарною ємністю 940 Гбайт.

У процесі зчитування або запису в приводі SVOD (ці операції можна проводити з використанням стандартної оптичної і електронної систем звичайних DVD-приводів) використовується опорний диск, виготовлений з скла, на який переноситься тонкий гнучкий диск (подібно до пластинки в старому грамофоні) і кріпиться магнітним затискачем. Зміна у картриджі одного гнучкого диска на інший проводиться протягом 10 с. У приводі передбачений модуль буферної пам'яті, що дозволяє забезпечити безперервність процесів читання і запису даних. Розробники стверджують, що з переходом на використання «синьо-фіолетового» лазера можна підвищити ємність кожного гнучкого диска до 50 Гбайт, а сумарну ємність носія – до 10 Тбайт.

Як відомо, збільшити питому щільність запису оптичних носіїв можна за рахунок зменшення розміру плями, що формується променем лазера на шарі носія, що відбиває. Досягти цього можна як шляхом зменшення довжини хвилі лазера, так і збільшенням числової

апертури оптичної системи. Розроблена фахівцями Philips Research технологія оптичного запису в ближньому полі (Near-field optical recording) дозволяє зменшити розмір плями за рахунок значного скорочення відстані між оптичною головкою приво­ду і поверхнею диска, що, у свою чергу, дає можливість використовувати оптичну систему з великою числовою апертурою [8]. У дослідній установці, побудованій на базі лазера з довжиною хвилі 405 нм, ученим вдалося зменшити відстань між оптичною головкою приво­ду і поверхнею диска до 25 нм. Завдяки цьому з'явилася можливість оснастити вузол читання приво­ду оптичною системою з числовою апертурою 1,45. У результаті зменшення розміру плями збільшується ємність одношарового носія діаметром 120 мм до 75 Гбайт, що втричі більше в порівнянні з аналогіч­ним показником систем формату Blu-ray Disc.

Схоже рішення застосували розробники компанії Sony, що ство­рили технологію Near Field Communication (NFC). Величина зазору між оптичною головкою приво­ду і поверхнею диска складає всього порядку 20 нм. Застосування NFC дозволило збільшити ємність одно­шарового носія діаметром 120 мм до 60 Гбайт.

Група учених Гарвардського університету під керівництвом Ken Crozier запропонували застосовувати для фокусування променз не лі­нзи, а особливий нанооптичний прилад. Конструктивно він складається з двох позолочених нанострижнів, що розташовані на відстані 30 нм один від одного. Така конструкція дозволяє концентрувати ене­ргію променя лазера в точці, діаметр якої рівний відстані між кінцями стрижнів. Відстань між нанострижнями і «точкою фокусування» складає близько 10 нм. Запропонована технологія дозволяє значно збільшити щільність запису інформації на оптичних носіях. На один шар 120 мм дискf при використанні лазера з довжиною хвилі 830 нм можна записати порядку 3 Тбайт [8].

Технологія оптичного запису, відома як голографія, дозволяє за­безпечити дуже високу щільність запису при збереженні максималь­ної швидкості доступу до даних. Це досягається за рахунок того, що голографічний образ (голограма) кодується в один великий блок да­них, який записується всього за одне звернення. А коли відбувається читання, цей блок цілком витягується з пам'яті. Для читання або запи­су блоків голографічних даних («сторінок»), які зберігаються на світ­лочутливому матеріалі (за основний матеріал прийнятий ніобіт літійо

LiNbO<sub>3</sub>), використовуються лазери [24, 47, 58]. Теоретично тисячі таких цифрових сторінок, кожна з яких містить до мільйона біт, можна помістити в пристрій розміром з шматочок цукру. Теоретично очікується щільність даних в 1Тбайт на кубічний сантиметр (Тбайт/см<sup>3</sup>). Практично ж дослідники очікують досягнення щільності близько 10 Гбайт/см<sup>3</sup>. При такій щільності запису оптичний шар, що має товщину біля 1см, дозволить зберігати 1Тбайт даних. А якщо врахувати, що запам'ятовувальна система не має рухомих частин, і доступ до сторінок даних здійснюється паралельно, можна очікувати щільність в 1Гбайт/см<sup>3</sup> і навіть вищу [15, 16].

Надзвичайні можливості голографічної пам'яті зацікавили учених багатьох університетів і промислових дослідних лабораторій. Цей інтерес вже досить давно вилився в дві науково-дослідні програми. Одна з них – програма PRISM (Photorefractive Information Storage Material), метою якої є пошук відповідних світлочутливих матеріалів для зберігання голограм і дослідження їх запам'ятовувальних властивостей. Друга науково-дослідна програма – HDSS (Holographic Data Storage System) [67]. HDSS орієнтована на розробку апаратних засобів, необхідних для практичної реалізації голографічних запам'ятовувальних систем.

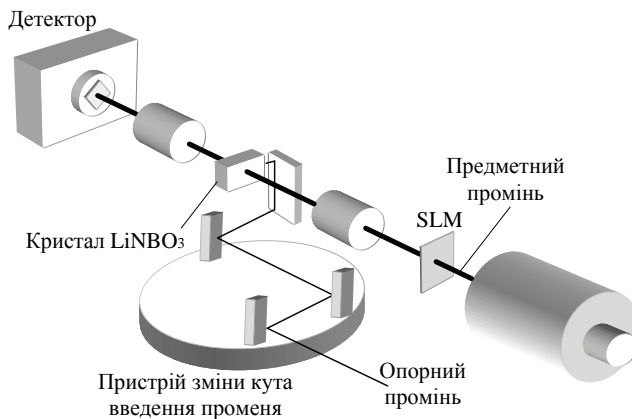


Рис. 1.6 – Схема запису/зчитування голографічної пам'яті

Розглянемо установку системи голографічної пам'яті, зібрану дослідницькою групою з Almaden Research Center [67]. На початковому етапі в цьому пристрої відбувається розділення променя синьо-зеленого аргонового лазера на дві складові – опорний і предметний промені (останній є носієм самих даних). Предметний промінь піддається розфокусуванню, щоб він міг повністю освітлювати просторовий світловий модулятор (SLM – Spatial Light Modulator), який є рідиннокристалічною (LCD) панеллю, на якій сторінка даних відображається у вигляді матриці, що складається із світлих і темних пікселів (рис. 1.6).

Обидва промені прямують всередину світлочутливого кристала, де і відбувається їх взаємодія. В результаті цієї взаємодії утворюється інтерференційна картина, яка і є основою голограми і запам'ятовується у вигляді набору варіацій показника заломлення або коефіцієнта віддзеркалення всередині цього кристала. При читанні даних кристал освітлюється опорним променем, який, взаємодіючи з інтерференційною картиною, яка зберігається в кристалі, відтворює записану сторінку у вигляді образу зі світлих і темних пікселів (голограма перетворює опорну хвилю в копію предметної). Потім цей образ прямує в матричний детектор, основою для якого служить прилад із зарядовим зв'язком (CCD – Charge-Coupled Device або ПЗЗ), захоплюючи всю сторінку даних. При читанні даних опорний промінь повинен падати на кристал під тим же самим кутом, під яким вироблявся запис цих даних, допускається зміна цього кута не більше ніж на градус. Це дозволяє одержати високу щільність даних. Змінюючи кут опорного променя або його частоту, можна записати додаткові сторінки даних в тому ж самому кристалі. Конструкція накопичувача на голографічних дисках наведена на рис. 1.7 [17, 67]. Його робоча поверхня сформована з якнайтоншої полімерної плівки товщиною 100 мікрон. Решта елементів не зменшилася: за допомогою LCD-панелі формуються сторінки даних, фотосенсор їх реєструє, а лазер генерує пучок когерентного світла.

Змінюючи кут при запису, можна зберегти в одному фоточутливому носії безліч окремих сторінок даних. Використовувана в тривимірній голографії процедура розташування декількох сторінок з даними в одному тому ж об'ємі називається мультиплексуванням. Традиційно використовуються такі методи мультиплексування: за кутом па-

діння опорного пучка, за довжиною хвилі й за фазою, але, на жаль, вони вимагають складних оптичних систем і товстих (товщиною в декілька міліметрів) носіїв, що робить їх непридатними для комерційного застосування у сфері обробки інформації. Bell Labs були винайдені три нові методи мультиплексування: зсувне, апертурне і кореляційне, основані на використанні зміни положення носія щодо світлових пучків [67]. Bell Labs вдалося побудувати експериментальний носій на основі ніобіта літію з щільністю запису біля 226 Гбайт на квадратний дюйм, який використовує техніку кореляційного мультиплексування.

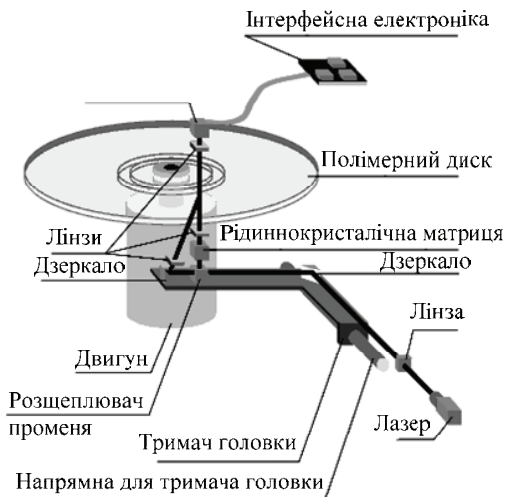


Рис. 1.7 – Накопичувач на голографічних дисках

Іншою складністю, що виникла на шляху створення пристроїв голографічної пам'яті, став пошук відповідного матеріалу для носія. Кристал ніобіта літію (з домішкою заліза) має неприємну властивість – чим більше голограм в ньому записано, тим слабший відгук дає кожна з них. Залежність ослаблення – квадратична. 1000 голограм дають зниження ефективності дифракції до 0,0001 % від початкової [15, 16]. Починають проявлятися електронні завади в устаткуванні, теплові шуми, чутливість сенсорів. Якщо фотографіям невеликі спотворення не дуже страшні, то для цифрових даних поява помилок при зчитуванні – набагато серйозніша. Тому був розроблений новий клас фото-

полімерних матеріалів. Створені матеріали мають триваліший життєвий цикл (у плані зберігання записаної на них інформації) і стійкі до дії температур, а також відрізняються поліпшеними оптичними характеристиками, загалом, підходять для одноразового запису даних (WORM) [65].

Одна з найбільш значних проблем голографічної пам'яті полягає в обмеженому «терміні служби» носіїв. Виявляється, що не тільки запис додаткових сторінок впливає на фотовластивості кристалів, але і зчитування теж, хоч і в меншій мірі. Освітлюючи носій опорним променем з метою відновити зображення певної сторінки даних, тим самим частково стираємо її. З кожним циклом голограма «бліднішає», а частота виникнення помилок поступово наближається до критичного рівня, за межами якого алгоритми корекції стають безсилі. Уникнути ослаблення сигналу можна декількома способами. Найбільш простим є термічний – досить нагрівати носій до 120 °С відразу після запису, і іони, що зсунулися з своїх позицій, притягнуті електричним полем, концентруватимуться навколо областей скупчення електронів. Після того, як кристал охолоне, іони вже не зможуть зрушити з місця, ніби намертво вплавилися в кристалічну решітку.

Ще один варіант фіксації називається «gating-процесом»: під час запису кристал освітлюють додатковим випромінюванням на частоті, яка відрізняється від частоти предметного і опорного променів. При цьому не обов'язково gating-освітлення повинне бути когерентним – його цілком може генерувати звичайний діод. Так, кристал ніобіта літію освітлюють променем лазера з довжиною хвилі 488 нм, тоді як голограма записується променем з довжиною хвилі 852 нм. Перевага трипроменевого методу відображає так зване gating-співвідношення, яке показує зміну фоточутливості кристала у присутності gating-випромінювання. В кращому разі співвідношення може досягати значень 5000/1. Таким чином, якщо при звичайному процесі запис здійснюється високоенергетичними фотонами зелено-блакитної області спектра, то за наявності зелено-блакитного gating-освітлення для цього вже досить енергії інфрачервоного лазера [15, 16]. Тепер запис однієї голограми вже не впливає на зображення інших. Додаткове джерело використовують тільки під час запису. Кількість циклів зчитування створеної у такий спосіб голограми збільшується в 4 рази.



*Наукове видання*

**Цирульник Сергій Михайлович  
Кожем'яко Володимир Прокопович  
Лисенко Геннадій Леонідович**

**АРХІТЕКТУРА ДИНАМІЧНИХ ОПТИЧНИХ  
ОПЕРАТИВНИХ ЗАПАМ'ЯТОВУВАЛЬНИХ  
ПРИСТРОЇВ НА ВОЛОКОННО-  
ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено С. Цирульником

Підписано до друку 19.11.2009 р.  
Формат 29,7×42¼ . Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 9,36.  
Наклад 100 прим. Зам № 2009-185.

Вінницький національний технічний університет,  
комп'ютерний інформаційно-видавничий центр.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-85-32  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-81-59  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/484>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>