



# МИР Физики и техники

Методы и устройства  
оптико-голографических  
систем архивной памяти

Под ред. д.т.н., проф.  
С.Б. Одинокова

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2018

УДК 004.072.3 + 535.512(075.8)

ББК 22.243.4

М54

*Рецензенты:*

*Венедиктов В.Ю.* – д.ф.-м.н., профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

*Вишняков Г.Н.* – д.т.н., профессор, начальник лаборатории ФГУП «ВНИИ оптико-физических измерений».

**М54 Методы и устройства оптико-голографических систем архивной памяти**

/ Под ред. С.Б. Одинокова / [Авторы: С.Б. Одинокоев, А.Ю. Бетин, В.И. Бобринев, Н.М. Вереникина, С.С. Донченко, Е.Ю. Злоказов, Д.С. Лушников, В.В. Маркин]

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 232 с. ISBN 978-5-94836-507-7

Рассмотрены основные типы систем памяти цифровой информации на оптических дисках и голографических носителях, приведены требования и определены основные характеристики и параметры оптико-голографических систем архивной памяти.

Проанализированы методы мультиплексирования микроголограмм Фурье на голографический носитель. Рассмотрены основные оптические схемы регистрации цифровой информации в виде одиночных и наложенных микроголограмм оптико-голографических систем архивной памяти, приведены требования к их узлам и блокам. Приведен метод компьютерного синтеза одномерных и двухмерных микроголограмм Фурье и проанализированы оптические схемы для их считывания и записи на голографический носитель.

Книга открывает перспективы для дальнейших исследований, разработок и проектирования конкретных оптико-голографических устройств и систем архивной памяти с записью цифровой или аналоговой информации.

Издание будет полезно как для ученых и специалистов, работающих в области голографических технологий, оптико-электронных голографических корреляционных систем распознавания изображений, голографической микроскопии, так и для студентов и молодых специалистов, обучающихся и желающих работать в данной области науки и техники.

УДК 004.072.3 + 535.512(075.8)

ББК 22.243.4

© 2018, С.Б. Одинокоев

© 2018, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-507-7

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . . 8

**Глава 1. Оптические дисковые системы памяти с побитовой записью и считыванием цифровой информации.** — *Н.М. Вереникина, Д.С. Лушников, В.В. Маркин, С.Б. Одинокоев.* . . . . . 15

1.1. Однослойные оптические дисковые системы памяти типа 2D с побитовой записью в одном тонком слое регистрирующей среды. . . . . 15

1.2. Многослойные оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждом отдельном слое . . . . . 21

1.3. Оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждой отдельной плоскости внутри толстой регистрирующей среды. . . . . 26

Литература. . . . . 33

**Глава 2. Голографические системы архивной памяти типа 3D с записью в объеме регистрирующей среды.** — *Н.М. Вереникина, Д.С. Лушников, В.В. Маркин, С.Б. Одинокоев* . . . . . 37

2.1. Принципы построения систем оптико-голографической системы архивной памяти со страничной записью и считыванием информации . . . . . 37

2.1.1. Страничное представление и кодирование цифровой информации для систем голографической памяти . . . 43

2.2. Оптические схемы записи страничной цифровой информации в виде одиночных микроголограмм Фурье . . . 46

2.2.1. Безлинзовая оптическая схема записи микроголограмм Фурье без диффузора . . . . . 48

2.2.2. Безлинзовая оптическая схема записи микроголограмм Фурье с диффузором . . . . . 53

2.2.3. Оптическая схема записи голограмм Фурье с объективами . . . . . 58

2.3. Методы борьбы с переэкспозицией фоточувствительной среды при записи голограмм Фурье . . . . . 66

2.3.1. Метод смещения плоскости регистрации . . . . .	66
2.3.2. Метод фазового кодирования объектного пучка с помощью фазовых диффузоров . . . . .	68
2.4. Методы и схемы мультиплексирования микроголограмм Фурье при записи на фоточувствительные регистрирующие среды. . . . .	84
2.4.1. Метод углового мультиплексирования и оптические схемы записи и считывания информации с микроголограмм Фурье на основе многоканальных оптических головок . . . . .	93
2.5. Современное состояние в области разработки систем оптико-голографической мультигигабайтной памяти . . . . .	104
2.5.1. Разработки оптико-голографической системы памяти компаний InPhase, Akonia . . . . .	107
2.5.2. Разработка оптико-голографической системы памяти компании Optware . . . . .	111
2.5.3. Оптико-голографическая система памяти Института автоматики и электрометрии СО РАН на основе метода многослойной записи/считывания брэгговских решеток в объемных фоточувстви- тельных средах с многофотонным поглощением . . . . .	114
Литература . . . . .	120

**Глава 3. Типы фоточувствительных материалов  
и регистрирующих сред для оптико-голографических систем  
архивной памяти. — Н.М.Вереникина, Д.С. Лушников,  
В.В. Маркин, С.Б.Одинокоев . . . . .**

3.1. Требования к параметрам фоточувствительных материалов для систем архивной голографической памяти	124
3.2. Галогенидосеребряные фоточувствительные материалы . . . . .	129
3.2.1. Фоточувствительные галогенидосеребряные материалы АО «Компания «Славич» . . . . .	129
3.3. Фотополимерные материалы . . . . .	131
3.3.1. Фотополимеры фирмы DuPont . . . . .	133
3.3.2. Фотополимеры фирмы InPhase Technologies . . . . .	139
3.3.3. Фотополимерные материалы Института органической химии СО РАН. . . . .	140
3.3.3.1. Композиции на основе фоточувствительных материалов и стекол типа золь-гель-стекла . . . . .	140

3.3.4. Фотополимерные материалы «Диффен» Санкт-Петербургского НИУ ИТМО . . . . .	143
3.3.5. Сравнительная характеристика коммерческих фотополимерных материалов . . . . .	145
3.4. Фоточувствительные материалы на основе бихромированной желатины . . . . .	146
3.5. Фототерморефрактивные стекла Санкт-Петербургского НИУ ИТМО . . . . .	147
Литература . . . . .	151

<b>Глава 4. Методы и принципы построения оптико- голографической системы архивной памяти на основе компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье. — А.Ю. Бетин, В.И. Бобринев, С.С. Донченко, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одинокоев . . . . .</b>	<b>154</b>
--	------------

4.1. Теоретическое исследование метода получения компьютерно-синтезированных голограмм . . . . .	154
4.1.1. Математические основы компьютерного синтеза голограмм и формирования восстановленных изображений . . . . .	155
4.1.2. Компьютерный синтез голограммы Френеля . . . . .	159
4.1.3. Компьютерный синтез голограммы Фурье . . . . .	163
4.1.3.1. Эквивалентная оптическая схема синтеза голограммы Фурье . . . . .	163
4.1.3.2. Эквивалентная оптическая схема восстановления синтезированной голограммы Фурье . . . . .	165
4.2. Свойства компьютерно-синтезированных голограмм Фурье, используемых при записи страниц бинарных данных . . . . .	166
4.2.1. Ограничение динамического диапазона градаций амплитудного пропускания компьютерно- синтезированных голограмм Фурье . . . . .	167
4.2.2. Особенности фазового кодирования страницы бинарных данных при записи компьютерно-синтезированных голограмм Фурье . . . . .	168
4.2.3. Ограничение плотности записи цифровой информации на компьютерно-синтезированную голограмму Фурье . . . . .	173

4.3. Проекционный метод и одноканальная оптическая система записи двумерных микроголограмм Фурье на фоточувствительный материал . . . . .	177
4.3.1. Теоретическое моделирование оптической системы получения компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье . . . . .	179
4.3.2. Варианты построения проекционной оптической системы записи компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье на фоточувствительный материал . . . . .	183
4.3.2.1. Источники излучения для проекционной оптической системы записи КСГФ . . . . .	184
4.3.2.2. Особенности использования современных пространственных модуляторов света в проекционной оптической системе записи микроголограмм Фурье . . . . .	185
4.3.2.3. Особенности использования современных OLED-микродисплеев в проекционной оптической системе записи микроголограмм Фурье . . . . .	190
4.3.2.4. Экспериментальное макетирование устройства записи КСГФ на основе ЖК ПМС, ЖККП ПМС и OLED-дисплея в проекционной оптической системе . . . . .	191
Литература . . . . .	194
 <b>Глава 5. Оптико-электронные устройства для записи и считывания цифровой информации с мультиплексированных одномерных компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье. — А.Ю. Бетин, В.И. Бобринев, Н.М. Вереникина, С.С. Донченко, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одинокоев</b>	
5.1. Метод мультиплексирования при получении одномерных микроголограмм Фурье и оптический эквивалент системы записи . . . . .	196
5.1.1. Проблемы мультиплексной записи и считывания цифровой информации при получении двумерных микроголограмм Фурье . . . . .	197
5.1.2. Метод и алгоритм расчета одномерных микроголограмм Фурье . . . . .	198

5.1.3. Эквивалентная схема восстановления изображений, закодированных на одномерных КСГФ . . . . .	199
5.1.4. Эквивалентная схема восстановления изображений, закодированных на одномерных КСГФ . . . . .	200
5.2. Принципы построения оптических систем устройств записи мультиплексированных одномерных компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье и считывания с них цифровой информации . . . . .	202
5.2.1. Проекционная оптическая схема записи одномерных 1D-микроголограмм Фурье с мультиплексированием типа «угловой поворот» . . . . .	202
5.2.2. Исследование режимов экспонирования и химической обработки фотопластин ВРП для определения их линейного участка и динамического диапазона . . . . .	207
5.2.3. Варианты построения системы считывания мультиплексных одномерных микроголограмм Фурье .	210
5.2.3.1. Оптическая система с постраничным считыванием мультиплексных одномерных микроголограмм Фурье . . . . .	210
5.2.3.2. Оптическая система с построчным считыванием мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье . . . . .	212
5.2.4. Синтез оптической системы с постраничным считыванием мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье . . . . .	215
5.2.4.1. Наведение оптической системы на мультиплексированные одномерные голограммы при считывании. . . . .	217
5.3. Декодирование цифровой информации с восстановленных изображений страниц данных . . . . .	219
Литература . . . . .	230
Заключение . . . . .	232

## ВВЕДЕНИЕ

В комплексе проблем, связанных с обработкой информации, одной из актуальных является задача хранения больших объемов архивной цифровой информации. Актуальность задачи обусловлена колоссальным объемом и лавинным ростом хранимой информации. Так, в 2000 г. был записан 1 экзабайт ( $10^{18}$  байт) информации, в 2006 г. — 2 экзабайта, в 2016 г. — уже 20 экзабайтов, т.е. в 10 раз больше, и эта тенденция сохраняется. Поэтому ежегодно требования к емкости систем хранения и памяти информации растут, по оценкам специалистов, примерно на 60% в год [3D лазерные технологии / Отв. редактор П.Е. Твердохлеб, 2003, Офсет, Новосибирск, 550 с.].

Наибольшее количество информации, требуемой для последующего архивного хранения в течение многих лет (до 25—50 лет), появляется при решении следующих прикладных задач:

- 1) хранение аэрокосмических снимков и изображений, получаемых с орбитальных спутников, предназначенных для экологического мониторинга поверхности земли, при разведке полезных ископаемых, обнаружении объектов в военных целях и др.; оценки показывают, что только с одного спутника в сутки поступает на землю до 1 ГБ информации в цифровом виде, а количество спутников для мониторинга на сегодня исчисляется сотнями, т.е. количество информации просто колоссально;
- 2) хранение медицинских изображений персонально для физических лиц; в развитых странах ставится задача персонального сохранения в цифровом виде рентгеновских и томографических снимков каждого человека, начиная от рождения и до преклонного возраста; так, только в Европе оценка количества снимков составляет до 200 снимков/чел  $\times$  500 млн человек =  $10^{11}$  снимков или в цифровом виде до 5000 ТБ информации;
- 3) хранение персональных данных физических лиц в виде их паспортов, пластиковых банковских карточек, дипломов об образовании, сведений о месте проживания и др.; так, при пересечении границ стран с последующим паспортным контролем требуется хранить данные о сотнях миллионов паспортов физических лиц, что особенно важно при борьбе с международным



терроризмом и в глобальном масштабе представляет пока нерешенную задачу;

- 4) есть целый ряд более простых, но не менее важных задач, например по архивному хранению строительной документации; так, в Москве с 1947 г. и по настоящее время в подразделениях МЧС в обязательном порядке хранятся все поэтажные планировки и чертежи всех возведенных и возводимых зданий, что также оценивается до 5000—10000 ТБ цифровой информации.

Таким образом, архивное хранение такого количества информации является даже более важной задачей, чем оперативное хранение на короткое время (обычно до 2—3 лет).

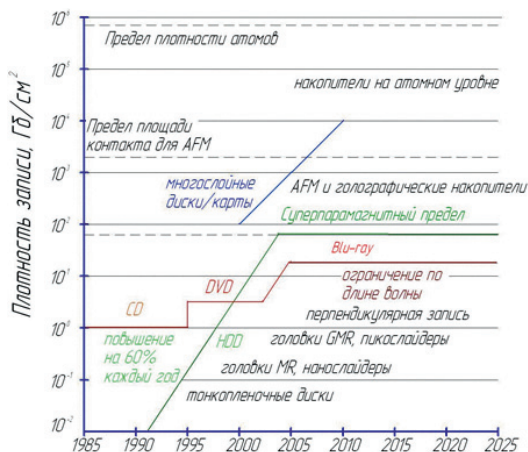
В то время как потребности хранения информации требуют увеличения емкости и быстродействия устройств массовой памяти, усовершенствование технологий современных электронных и магнитных систем хранения данных достигло своих физических пределов, которые ограничивают теоретически достижимые плотности записи информации, как это представлено на рис. 1. Кроме того, они имеют существенные недостатки:

- в магнитных системах до сих пор выполняется контактное считывание информации головкой с магнитного диска (часто называемых винчестерами), что приводит к полному осыпанию магнитного слоя через 2—3 года и необходимости замены всей дорогостоящей системы;
- в электронных носителях, называемых флешками, SSD-дисками и др., до сих пор не решена проблема защиты от стирания информации под воздействием импульсных электромагнитных полей, количество которых с каждым годом только увеличивается и может привести к катастрофическим последствиям.

Поэтому одним из эффективных путей решения указанной задачи архивного хранения цифровой информации до настоящего времени являются две оптические технологии:

- 1) запись, хранение и считывание информации с оптических CD/DVD-дисков и BD-дисков (Blu-Ray Disc);
- 2) запись, хранение и считывание информации с оптических голографических дисков.

Наиболее распространенные в настоящее время системы дисковой памяти с записью данных на поверхности оптического но-

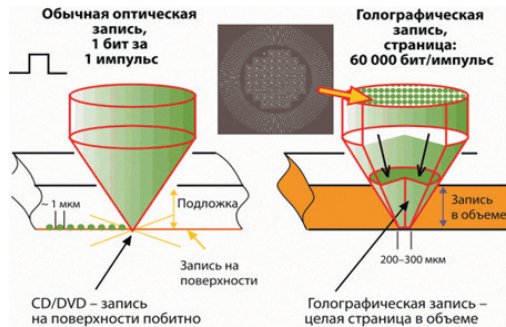


**Рис. 1.** История и перспективы развития характеристик систем памяти

сителя подошли к пределу плотности записи, обусловленному как техническими и технологическими причинами, так и фундаментальными. Дальнейшее развитие технологии оптической памяти возможно за счет использования толстых регистрирующих сред. Это направление реализуется путем многослойной записи информации, а также путем наложенной записи объемных голограмм в толстых фоточувствительных материалах. Технология наложенной голографической записи страниц информации достигла значительных успехов и близка к выходу на потребительский рынок. Однако для эффективного использования при этом страничного формата данных необходимо разрабатывать новые параллельные системы связи с компьютером.

На рис. 2 представлены схемы записи информации для обычного оптического диска и для трехмерной оптико-голографической памяти (ОГП), в которой теоретически возможная плотность записи данных может составлять  $\sim 1,0$  ТБ/см<sup>3</sup> и скорость передачи данных — сотни мегабайт в секунду. Это возможно благодаря:

- 1) переходу от последовательной записи/считывания битов информации к двумерному (параллельному) вводу/воспроизведению одновременно страниц данных, содержащей несколько мегабит цифровых данных;



**Рис. 2.** Побитовая и постраничная организация оптической памяти

2) организации наложенной (мультиплексной) голографической записи многих голограмм с последующим селективным восстановлением каждой голограммы, что позволяет использовать «информационный» ресурс объемного регистрирующего материала. Устройства ОГП обеспечивают высокую защищенность и длительность хранения информации, а также высокую надежность и помехоустойчивость хранения информации благодаря большой избыточности записи. Каждая из единиц информации записывается в голограмме в виде интерференционной картины, распределенной по всему объему регистрирующей среды. В этом случае неконтролируемая потеря в среде части такой картины не влечет за собой потерю всей информации. Все эти достоинства ОГП реализуются особенно при записи цифровой информации (а в настоящее время не только цифровая информация, но и аналоговая — фотографии, кинофильмы и др., используют цифровое кодирование).

Таким образом, голографическая технология хранения информации является перспективной и на ее разработку направлены усилия многих научно-исследовательских коллективов во всем мире. Однако основной проблемой ОГП является обеспечение исследований в этой области фоточувствительными и регистрирующими материалами с высокой энергетической чувствительностью и разрешающей способностью, обеспечивающими длительное хранение и неструктивное считывание голограмм. Кроме того, классические ОГП характеризуются сложной оптической систе-

мой, необходимостью применения дорогих лазеров, пространственных модуляторов света с высокой частотой смены кадров и высокими оптическими характеристиками, а также дорогостоящими высокопроизводительными фотоприемными устройствами.

В соответствии с вышеизложенным в настоящей книге приводятся материалы, посвященные разработке архивной оптико-голографической памяти (ОГП), например, для записи/считывания на голографический накопитель видеосигналов цифрового потока со скоростью до 25 Мб/с и с разрешением не менее  $720 \times 576$  пикселей. При этом должна обеспечиваться непрерывная запись видеoinформации в течение не менее 1 часа, т.е. непрерывная запись  $25 \text{ Мб/с} \times 3600 \text{ с} = 90 \text{ Гб}$  или 11,25 Гб часового потока цифровой информации. Последние достижения в области разработки ОГП показывают возможность записи до 500 Гб информации на голографический диск с размерами обычного ВD-диска 120 мм, на котором можно записывать не более 25 Гб на одну сторону.

В первой главе проанализированы основные типы оптических систем памяти цифровой информации на оптических однослойных CD/DVD/BD-дисках (называемых также двухмерными 2D-дисками), а также многослойные диски (называемые часто трехмерными 3D-дисками) с побитовой записью и считыванием. Также рассмотрены принципы создания терабайтных оптических систем архивной памяти типа 3D с побитовой записью и считыванием цифровой информации в объеме регистрирующей среды.

Во второй главе рассматриваются методы и устройства оптико-голографических систем архивной памяти типа 3D с записью в объеме регистрирующей среды. Также рассматривается страничное представление и кодирование цифровой информации для систем голографической памяти, методы фазового кодирования объектного пучка с помощью фазовых масок и диффузоров, методы мультиплексирования микроголограмм Фурье при записи на фоточувствительные материалы и регистрирующие среды.

В третьей главе приводится обзор основных типов фоточувствительных материалов и регистрирующих сред, используемых при записи мультиплексных микроголограмм Фурье. Кратко анализируются параметры и возможности новых фототерморефрактивных стекол для многослойной записи микроголограмм Фурье.

В четвертой главе рассматриваются новые методы и принципы построения ОГП на основе компьютерно-синтезированных мик-

роголограмм Фурье. В качестве альтернативы классическому двух-лучевому методу записи голограмм предлагается использование методов их компьютерного синтеза. В этом случае цифровая страница информации с помощью численных расчетов кодируется, формируется в виде компьютерно-синтезированной голограммы Фурье (или Френеля), а затем выводится в оптическую систему на пространственный модулятор света (ПМС). Далее с помощью проекционного метода фотолитографии голограмма Фурье с ПМС уменьшается до требуемых размеров (например до  $0,3 \times 0,3$  мм) и перезаписывается на фоточувствительный материал, который после соответствующей фотохимической обработки преобразуется в микроголограмму Фурье на голографическом диске. Показывается, что использование компьютерно-синтезированных голограмм и проекционной оптической системы (фотолитографии) приводит к резкому снижению массогабаритных параметров оптических систем и увеличению скорости записи информации.

В пятой главе рассматривается оригинальный метод и оптико-электронные устройства для записи и считывания цифровой информации с мультиплексированных одномерных компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье как с построчным, так и с постраничным считыванием информации. Рассматриваются параметры и особенности применения ПМС на основе жидких кристаллов для ввода в оптический канал компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье.

Основное содержание книги составляют оригинальные научно-технические результаты, полученные авторами в рамках выполнения конкретных прикладных НИР и ОКР, проводимых в рамках целевых программ Министерства образования и науки РФ, а также по заданиям государственных и коммерческих организаций, занимающихся проблемой архивного долговременного хранения информации. В частности, это относится к результатам, содержащимся в четвертой и пятой главах книги.

Общее редактирование книги проведено д.т.н., профессором С. Б. Одиноквым. Главы 1—3 написаны к.т.н., доц. Н. М. Вереникиной, Д. С. Лушниковым, В. В. Маркиным, д.т.н., проф. С. Б. Одиноквым, глава 4 — А. Ю. Бетиним, к.ф.-м.н., с.н.с. В. И. Бобриневым, С. С. Донченко, к.ф.-м.н., с.н.с. Е. Ю. Злоказовым, д.т.н., проф. С. Б. Одиноквым, глава 5 — А. Ю. Бетиним, к.ф.-м.н., с.н.с. В. И. Бобриневым, к.т.н., доц. Н. М. Вереники-

ной, С. С. Донченко, к.ф.-м.н., с.н.с. Е. Ю. Злоказовым, д.т.н., проф. С. Б. Одиноквым.

Авторы выражают большую благодарность за проявленный интерес к работе и ее поддержку от АО «Научно-производственное объединение «Криптен»» (г. Дубна, Россия), ФГУП «НТЦ «АТЛАС», благодарность за помощь в компьютерном моделировании Талалаеву В. Е. и в экспериментах Ханевичу П. А., за плодотворное обсуждение результатов работы Жердеву А. Ю., Цыганову И. К., а также Найден Л. А. за помощь при оформлении и редактировании материалов книги.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам — д.ф.-м.н., профессору Венедиктову В. Ю. и д.т.н., профессору Вишнякову Г. Н. за титанический труд по прочтению и обсуждению материалов и результатов работы, представленных в данной книге.

По мнению авторов, данная книга открывает перспективы для дальнейших исследований в области создания ОГП с повышенной емкостью и малыми массогабаритными параметрами, будет полезна как для ученых и специалистов, работающих в сфере хранения больших массивов информации, так и для студентов и молодых специалистов, обучающихся и желающих работать в данной области науки и техники.

## **ГЛАВА I**

# **ОПТИЧЕСКИЕ ДИСКОВЫЕ СИСТЕМЫ ПАМЯТИ С ПОБИТОВОЙ ЗАПИСЬЮ И СЧИТЫВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ**

В настоящее время существует несколько вариантов оптической дисковой памяти с побитовой записью и считыванием цифровой информации:

- 1) однослойные оптические дисковые системы памяти типа 2D с побитовой записью в одном тонком слое регистрирующей среды [1];
- 2) многослойные оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждом отдельном слое, объединенные затем в многослойную структуру [1];
- 3) оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждой отдельной плоскости внутри толстой регистрирующей среды [2].

### **1.1. Однослойные оптические дисковые системы памяти типа 2D с побитовой записью в одном тонком слое регистрирующей среды**

Было разработано и существует несколько вариантов однослойных оптических дисковых систем памяти типа 2D с побитовой записью в одном тонком слое (поверхностном слое) регистрирующей среды, называемых в ранней литературе двухмерными оптическими дисковыми системами записи и воспроизведения информации [1].

Массовое внедрение систем побитовой оптической памяти началось с принятия в 1982 г. международного стандарта на аудиокомпакт-диск — CD (Compact Disc), где запись/воспроизведение данных проводится с помощью сфокусированного лазерного пучка на диске диаметром 120 мм. Оптический диск представляет собой плоский металлизированный диск с цифровой информацией, закодированной в виде ряда информационно-несущих углублений (pits — питов), расположенных вдоль дорожек по спирали, распространяющейся от центра к периферии [2]. Отражающие информационные питы соответствующей глубины предназначены для создания модуляции интенсивности отраженного лазерного излучения.

В дальнейшем технология CD была распространена также для записи, хранения и воспроизведения видеоинформации, а также для хранения software, например, для персональных компьютеров.

Информационный носитель CD-ROM (только для чтения) устроен так, что пользователь не может записывать на нем свою информацию. Она записывается и тиражируется только производителем оптических дисков и не может быть стерта для повторной записи [2—4]. На дисках CD-ROM стало возможным размещать 650 МБ, а затем и 1 ГБ двоичных данных. В лазерных накопителях использовались полупроводниковые лазеры с длиной волны 0,78 мкм, числовая апертура выходного фокусирующего микрообъектива составляла 0,45, расстояние между дорожками — 1,6 мкм, а минимальный размер информационного «следа» при записи — 0,83 мкм.

Кроме оптических дисков типа CD-ROM были разработаны оптические диски памяти типа CD-WORM (write-once, read many) с возможностью однократной записи и многократного считывания, а также перезаписываемые оптические диски типа CD-RW (ReWritable).

В информационных носителях типа CD-WORM в качестве фоточувствительной среды обычно используются материалы, содержащие в своем составе органические вещества из класса цианиновых или фталоцианиновых красителей, изменяющих свои поглощательные свойства при записи информации [5].

В основе работы переписываемой оптической памяти типа CD-RW лежит обратимый магнитооптический эффект [6], основанный на эффекте локального лазерного разогрева и переориентации магнитных доменов при наличии внешнего магнитного



поля [1], или фазовый переход «аморфная — поликристаллическая» структуры в халькогенидных полимерных средах [7—9].

В 1997 г. был реализован один из вариантов оптической дисковой памяти типа DVD (аббревиатура Digital Versatile Disc — «цифровой универсальный диск», а для видео — Digital Video Disc — «цифровой видеодиск»). В этом случае использовались полупроводниковые лазеры с длиной волны 0,65 мкм, числовая апертура выходного фокусирующего микрообъектива составляла 0,6, расстояние между дорожками — 0,74 мкм, а минимальный размер информационного «следа» при записи — 0,4 мкм, что представлено на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Структура оптического диска типа DVD [50—51]

Таким образом, можно констатировать следующую классификацию:

- *CD/DVD-ROM* — информация хранится в отражающих питах и считывается при сканировании поверхности диска сфокусированным лазерным лучом; их достоинством является легкость массового тиражирования с помощью мастер-диска;
- *CD/DVD-WORM* — отражательныепиты формируются путем термического нагрева слоя сфокусированным лазерным лучом; плотность записи обычно ниже, чем у ROM-дисков, а для ее повышения используются красные или голубые лазеры;
- *магнитооптические RW-диски* — информационный пит формируется при одновременном воздействии сфокусированного лазерного луча и внешнего магнитного поля, причем в областях слоя, температура которых превышает температуру Кюри, локальная ориентация магнитных доменов определяется ориентацией внешнего магнитного поля; это проявляется в небольших (порядка долей градуса) изменениях вектора поляризации считывающего излучения в соответствии с магнитооптическим эффектом Фарадея [6].

В дисках типа CD-RW вследствие малой величины изменения поляризационных характеристик считывающего пучка эффективность использования интенсивности этого излучения при считывании не превышает долей процента. Вместе с тем, используя ультракороткие записывающие импульсы и учитывая гауссово пространственное распределение интенсивности в них, с помощью этого метода можно получать информационныепиты размером порядка 200—300 нм [10].

К сожалению, как CD-, DVD-, так и магнитная память хранит информацию на поверхности регистрирующей среды, что ограничивает ее предельную информационную емкость в пределах до 1 Гб.

В настоящее время основные усилия разработчиков средств оптической памяти направлены на:

- увеличение плотности и объема записываемой (хранимой) информации;
- повышение скорости ее записи (для записываемых и/или перезаписываемых носителей) и считывания;
- повышение длительности хранения (временной устойчивости) записанной информации.

Стабильность эксплуатационных свойств носителей в процессе длительного хранения в основном зависит только от конструкции и компонентного состава отдельных их элементов.

Первые две задачи до настоящего времени решались тремя основными способами. Прежде всего путем уменьшения геометрических размеров элементарного носителя информации (пита) и расстояний между соседними дорожками (треками) на информационно-несущем слое. Это возможно как с уменьшением длины волны источников излучения, используемых для записи и считывания информации, так и (или) с увеличением числовой апертуры NA оптической системы (как это сделано в стандартах DVD, Blu-Ray и т.д.).

Это было сделано в оптических дисках типа Blu-Ray (BD-диски). Минимальная длина метки записи в BD-дисках уменьшена до 0,16 мкм. Это позволило увеличить плотность записи более чем в 4 раза, доведя емкость однослойного диска до 25 Гб. Однако увеличение числовой апертуры, уменьшение толщины защитного слоя до 0,1 мм не позволяет использовать головки DVD, а оснащение приводов второй головкой и дорогим синим лазером приводит к увеличению стоимости записывающей оптической головки.

Как видно из табл. 1.1 и рис. 1.1–1.2, все эти стандарты объединяет только единство геометрического размера самих дисков (120 мм), используемые лазеры и микрообъективы различны. Вместе с тем хорошо известно, что в соответствии с критерием Рэля минимально допустимый размер  $D_{\min}$  сфокусированного пятна ограничивается дифракционным пределом, определяемым соотношением между длиной волны  $\lambda$  записывающего (считывающего) оптического излучения и числовой апертурой NA используемой оптической системы:

$$D_{\min} = 0,81 \lambda/NA. \quad (1)$$

Следовательно, площадь сфокусированного светового пятна может быть пропорциональна  $(\lambda/NA)^2$ . Таким образом, при традиционных оптических устройствах записи (считывания) информации для повышения информационной плотности и, соответственно, емкости оптических дисков стандартных размеров (диаметром 120 мм) необходимо уменьшать длину волны считывающего излучения и/или повышать величину числовой апертуры, как это сделано в BD-дисках (рис. 1.2).

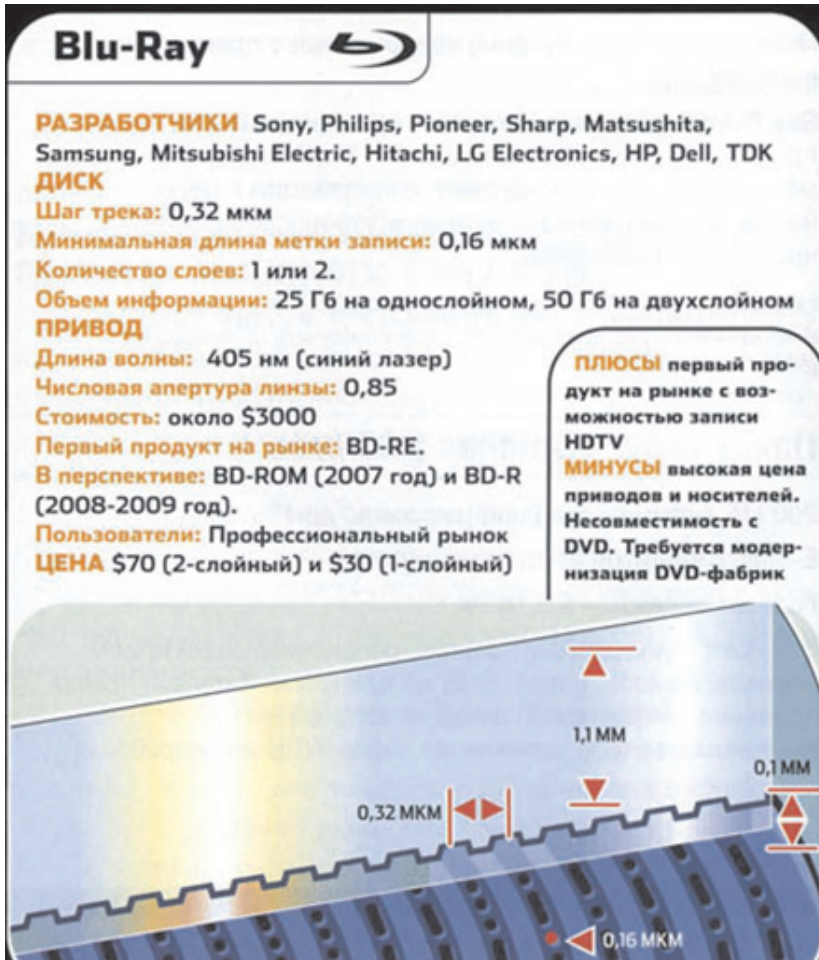


Рис. 1.2. Структура диска типа BD [50—51]

Однако использование высокоапертурных объективов повышает абберационные искажения (пропорционально  $\lambda/(NA)^4$ ), снижает надежность работы записывающей (считывающей) аппаратуры и в разы увеличивает их стоимость.

Для устранения отрицательного влияния этих искажений в системах однослойной оптической памяти с однолинзовыми объек-

тивами вводятся специальные статические или динамические (например, на основе жидкокристаллических пространственных модуляторов) корректоры.

Таким образом, поскольку вышеописанные типы оптических дисков регистрируют информацию на поверхности, предельная плотность записываемой информации ограничивается физическим дифракционным пределом и составляет приблизительно  $1 \text{ Гб/см}^2$ . В настоящее время наибольшее распространение получили BD-диски для видеосистем.

## **1.2. Многослойные оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждом отдельном слое**

Другим путем повышения информационной емкости оптических носителей побитовой записи и считывания информации является использование многослойных регистрирующих структур. Слои разделены воздушными промежутками и совмещаются путем склеивания. В этих системах запись и считывание информации осуществляется путем перефокусировки лазерного пучка на внутренние информационные слои, при этом ближний к пучку слой является полупрозрачным [12—13]. Разработаны следующие типы многослойных дисков.

### **1) Многослойные DVD-диски**

Имеются следующие варианты изготовления многослойных DVD-дисков:

- 1) односторонние однослойные с емкостью 4,7 ГБ;
- 2) односторонние двухслойные с емкостью 9,4 ГБ;
- 3) двухсторонние однослойные с емкостью 9,4 ГБ;
- 4) двухсторонние двухслойные с емкостью 17 ГБ.

Как видим, в традиционных (отражательных) системах, например ROM-типа, число таких информационно-несущих слоев очень ограничено. Это связано с тем, что интенсивность оптического пучка, считывающего некоторый  $i$ -й информационный

слой, уменьшается вследствие частичного поглощения и отражения в слоях, находящихся между этим слоем и источником считывающего излучения. Кроме того, имеющиеся локальные изменения показателя преломления в области расположения информационных бит и вне ее искажают волновой фронт когерентного лазерного считывающего излучения за счет случайных дифракционных и светорассеивающих эффектов. Это сказывается на точности его фокусировки в плоскости считываемого слоя. По этой причине современные традиционные носители информации имеют, как правило, не более четырех информационно-несущих слоев (по два на каждой из сторон).

При использовании алгоритма компрессии/декомпрессии данных MPEG-4 (Moving Picture Experts Group) на двухслойном одностороннем диске может быть записан более чем 4-часовой видеofilm самого высокого качества — 60 кадров/с, разрешение  $720 \times 480$  пикселей.

## 2) Многослойные флуоресцентные FMD-диски (рис. 1.3)

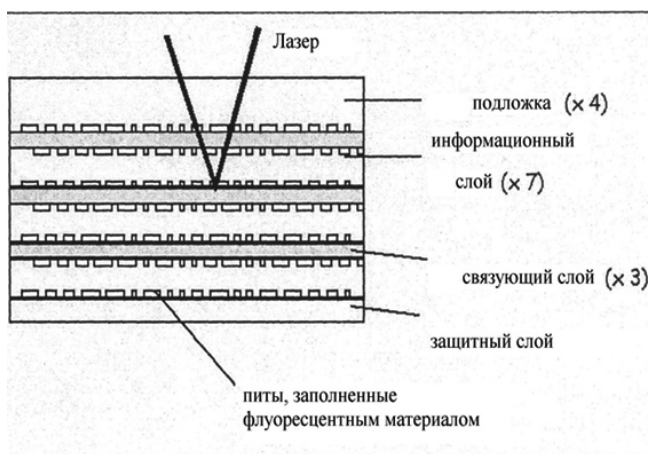


Рис. 1.3. Принципы записи на многослойные флуоресцентные FMD-диски [50—51]

Более всего идее практической реализации формирования и использования многослойных носителей информации отвечают так называемые флуоресцентные (люминесцентные) диски

(FMD — Fluorescent Multilayer Disk), в которых для записи и считывания информации также используются традиционные лазерные источники излучения или лазерные диоды.

Детектирующие элементы в устройстве считывания регистрируют интенсивность некогерентного вторичного (флуоресцентного) излучения, возбуждаемого считывающим лазером в области расположения информационно-несущих пит. Вследствие некогерентного характера вторичного излучения значительно снижается влияние искажающих вышеописанных факторов при его распространении в такой многослойной регистрирующей среде. По расчетам C3D Inc., общее число информационных слоев в ней теоретически может достигать 100 и более [1, 14–16]. Однако с учетом значительного усложнения конструкции записывающего (считывающего) устройства с ростом числа слоев реальное их число в настоящее время не превышает 10.

В общем случае флуоресцентный многослойный носитель информации может быть реализован как оптический диск, карта или лента. Структура такого диска информации ROM-типа описана в [17]. Информация в каждом из таких слоев формируется, например, как последовательность флуоресцирующих и нефлуоресцирующих микрообластей (ячеек). Флуоресцирующие ячейки (питы) толщиной от 0,3 до 0,8 мкм выполнены в виде полимерной матрицы с изотропно растворенными в нем органическими молекулами люминофора. Информационные слои (как представлено на рис. 1.3) разделены между собой прозрачными на длинах волн считывающего (лазерного) и считываемого (некогерентного, люминесцентного) излучений слоями толщиной от 10 до 100 мкм.

Когда флуоресцирующая ячейка (информационный пит), находящаяся в некотором  $i$ -м информационном слое, освещается сфокусированным считывающим излучением, молекулы люминофора генерируют флуоресцентное излучение, являющееся оптическим сигналом, считываемым детектирующим устройством. Детектирующее устройство, в свою очередь, содержит дополнительные элементы, препятствующие попаданию на фотоприемник паразитного флуоресцентного излучения от других (несчитываемых) информационных слоев. Например, таким элементом может быть конфокальная точечная диафрагма (a confocal pinhole), расположенная перед фотоприемником и пространственно блокирующая флуоресцентные сигналы от других слоев, находящихся вне фокуса.

При этом для достижения высокой скорости считывания информации необходима максимально возможная мощность информационно-несущего флуоресцентного сигнала. Однако, хотя разрабатываемые в настоящее время многослойные флуоресцентные носители ROM-типа позволяют существенно повысить информационную емкость оптической памяти, они имеют ряд существенных недостатков.

Прежде всего это связано с низким коэффициентом полезного использования интенсивности считывающего излучения. В традиционных оптических дисках пространственная геометрия отраженного от диска считываемого излучения практически тождественна пространственной геометрии падающего на диск считывающего излучения. Во флуоресцентных дисках геометрическая характеристика считываемого (флуоресцентного) излучения отлична от таковой характеристики сфокусированного считывающего (возбуждающего) излучения. Возбуждаемое (флуоресцентное) излучение распространяется практически изотропно во всех направлениях от возбужденного пита (ячейки). Следовательно, собираемое объективом флуоресцентное излучение составляет только небольшую часть всего флуоресцентного излучения. Более того, даже интегральная интенсивность флуоресцентного сигнала, как правило, существенно ниже интенсивности возбуждающего (считывающего) излучения. Это связано с тем, что квантовый выход люминесценции молекул люминофора, как правило, значительно ниже единицы, поскольку часть этого излучения теряется в результате безызлучательного переноса энергии возбуждающих квантов света. В случае изотропного пространственного распределения флуоресцирующих молекул в полимерной матрице информационного пита при считывании информации поглощать (и, следовательно, переизлучать) будут молекулы, преимущественно ориентированные параллельно вектору поляризации считывающего излучения, т.е. приблизительно третья часть от всего количества флуоресцентных молекул в пите. Таким образом, интенсивность считываемого флуоресцентного излучения будет приблизительно в три раза меньше максимально возможной.

Указанные недостатки приводят к значительному ослаблению интенсивности принимаемого информационно-несущего флуоресцентного сигнала, величина которого становится соизмеримой



с величиной «фонового» шумового сигнала от посторонних световых засветок и с величиной дробового шума приемного устройства, т.е. к снижению отношения сигнал/шум при считывании.

### 3) Многослойные VMD-диски (рис. 1.4)

К многослойным технологиям следует отнести также VMD-диск (Versatile Multilayer Disk — универсальный многослойный диск), впервые представленный на выставке СЕВИТ-2005, параметры которого показаны на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Структура многослойного диска типа VMD [50—51]

Структура VMD полностью идентична структуре двухслойного DVD (совпадает даже шаг дорожек и размер меток записи), только за счет варьирования коэффициента отражения и пропускания

слоев количество слоев больше (например, продемонстрировано на выставке восемь). Это дает возможность выпускать их на том же оборудовании и при этом записывать на один диск информацию объемом до 100 Гб. Модернизация DVD-привода (добавление системы перефокусировки на более глубокие слои) позволяет их использовать в качестве VMD-привода.

В многослойных флуоресцентных носителях информации WORM-типа оптическое кодирование может осуществляться путем изменения локальной (попитовой) концентрации люминофора, или интенсивности, или энергии записывающего излучения, обеспечивающего возможность декодирования интенсивности флуоресцентных сигналов на стадии считывания.

Как отмечается исследователями, наиболее перспективным методом обеспечения оптического кодирования является поляризационное кодирование и декодирование информации с использованием так называемых фотоанизотропных материалов [18, 19].

### **1.3. Оптические дисковые системы памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждой отдельной плоскости внутри толстой регистрирующей среды**

Увеличение плотности побитовой записи может быть достигнуто за счет использования всех трех пространственных измерений объема информационного слоя носителя. В настоящее время наибольший научный и практический интерес вызывает разработка оптических дисковых систем памяти типа 3D с фокусировкой лазерного излучения и побитовой записью в каждой отдельной плоскости внутри толстой регистрирующей среды [20, 21].

Здесь используются линейные однофотонные и нелинейные двухфотонные механизмы поглощения в специфических регистрирующих средах для записи/считывания информации, реализуемые в условиях нано-, пико- и фемтосекундного взаимодействия лазерного излучения с веществом.