

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



**ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ**

**А.В. Вениаминов  
В.Н. Михайлов**

# **ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЗАПИСИ, ХРАНЕНИЯ И ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**



**Санкт-Петербург**

**2009**

**УДК 535.317**

**Вениаминов А.В., Михайлов В.Н. Оптические системы записи, хранения и отображения информации. Учебное пособие. Изд.1. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 94 с.**

В пособии представлены методические материалы по курсу «Оптические системы записи, хранения и отображения информации». Кратко изложены основные принципы действия оптических, как голографических, так и побитовых, систем хранения памяти, сведения об используемых в них светочувствительных материалах, представлены сведения о принципах действия устройств отображения информации (дисплеев) различных систем.

Учебное пособие предназначено для студентов СПбГУ ИТМО специальностей NN 2006006802, 010500. Рекомендовано к печати Ученым Советом факультета фотоники и оптоинформатики, протокол N5 от 18 февраля 2009 г.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009

© Вениаминов А.В., Михайлов В.Н. 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 4  |
| Архивная оптическая память, оптические диски.....  | 9  |
| Конструкция оптических дисков и механизмы записи информации.....                         | 10 |
| Повышение плотности записи информации на компакт-дисках.....                             | 16 |
| Длительность хранения информации на компакт-дисках.....                                  | 20 |
| Флуоресцентные диски.....  | 22 |
| Голографические системы записи и хранения информации. Принцип действия и устройства..... | 25 |
| Особенности голографического метода записи информации.....                               | 26 |
| Компоненты голографической памяти.....   | 33 |
| Экспериментальные разработки систем голографической памяти ..                            | 38 |
| Материалы для объёмной голографии ..   | 41 |
| Дисперсионная фоторефракция. Реоксан.....  | 52 |
| Диффузионное проявление (усиление) голограмм.....  | 57 |
| Перспективы систем оптической записи информации ..                                       | 64 |
| 2D- и 3D- системы отображения информации.....  | 65 |
| Основы колориметрии и фотометрии ..  | 65 |
| Двумерные дисплеи.....   | 72 |
| Трёхмерные дисплеи.....  | 90 |

## Введение

Информационные технологии должны обеспечивать совокупность методов и средств получения, хранения, переработки и отображения информации. За всю историю человечества информационные технологии прошли долгий путь развития от клинописи и письменности до книгопечатания и телеграфа, а затем до радиоволн и магнитных носителей информации.

Современные информационные технологии стали возможны благодаря следующим техническим достижениям:

1. появлению средств записи информации с высокими плотностью и быстродействием (магнитная, полупроводниковая память, оптические компакт-диски и голографические диски),
2. развитию технологий, обеспечивающих передачу информации в любую точку земного шара без существенных ограничений во времени, благодаря чему обеспечивается широкий охват населения разнонаправленными средствами связи (телевидение, спутниковая связь и навигация, информационные сети),
3. развитию технологий автоматизированной обработки информации.

Наиболее перспективным путем развития информационных технологий является применение оптических методов в процессах регистрации, обработки и хранения информации, поскольку традиционные электронные методы имеют ряд существенных недостатков и ограничений, в первую очередь, по быстродействию и плотности записи.

Среди **преимуществ оптических методов** перед другими следует отметить:

- высокую плотность записи информации ( $10^5$  бит/мм<sup>2</sup> и более).
- отсутствие (во многих, но не во всех случаях) непосредственного контакта между носителем и системой записи/считывания.
- при использовании голографических методов – параллельность, возможность ассоциативной выборки и другие преимущества
- быстродействие
- помехозащищенности
- разнообразие способов практической реализации, основанное на множестве механизмов взаимодействия света с регистрирующими средами.

Следующая схема (рис.1.) демонстрирует условную классификацию оптической памяти:

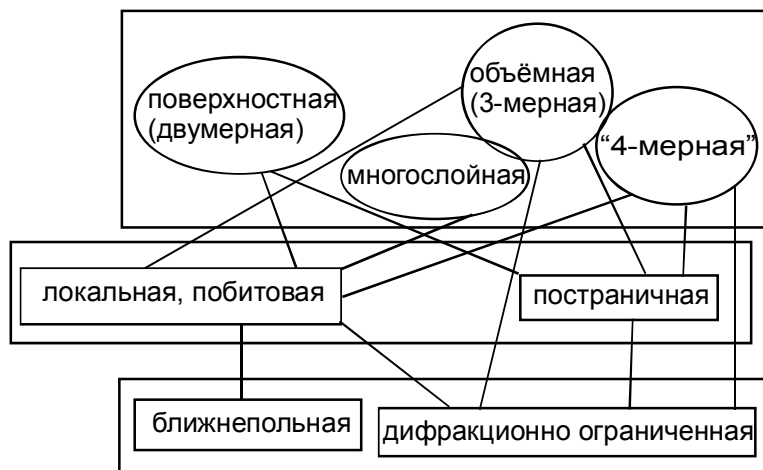


Рис.1. Условная классификация оптической памяти. Разграничение её типов не абсолютно: понятия постраничной и голографической памяти часто воспринимаются как синонимы, но голографическая по физическому механизму память может быть и побитовой (микроголограммы); обычно рассматривается её объёмная реализация, но она может быть и поверхностной, и даже квазиодномерной (спиральные голограммы). Под 4-мерностью понимается добавление к трём пространственным измерениям (объёму) ещё одного, например спектрального (пример – среды с выжиганием спектральных провалов).

Одним из важных средств повышения плотности записи информации является эффективное использование объёма, которое требует селективного обращения к хранящейся в ней информации; при этом могут применяться, в частности, следующие способы физической адресации:

- фокусировка по глубине (рис. 2)
- "двухфотонная" адресация (рис. 3)
- использование спектральной селективности материала (рис. 4)
- использование брэгговской угловой/спектральной селективности объёмной голограммы (рис. 5)

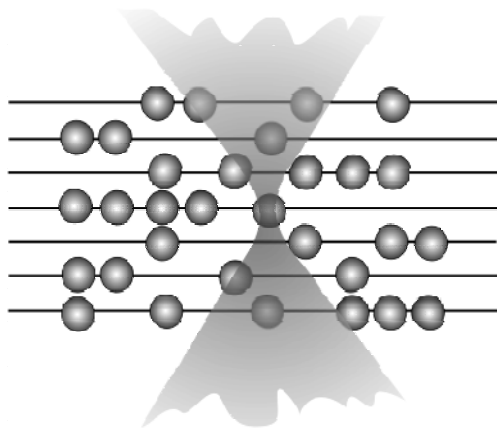


Рис.2. **Фокусировка** пучка в точке адресации: в световой пучок попадает большая область материала с хранящейся в нём информацией, но наиболее эффективно взаимодействие света с веществом в области перетяжки; локализация усиливается при многоквантовом характере взаимодействия

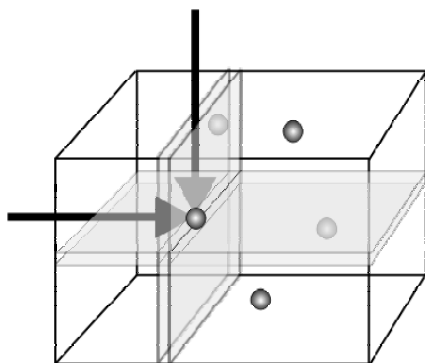


Рис.3. Принцип **двухфотонной адресации** в объёмной среде: один из световых пучков выделяет слой материала, другой – точку в этом слое; происходит обращение (запись или чтение) к точке, на которую пучки действуют одновременно, то есть в которой они пересекаются. Такой механизм адресации предусмотрен, например, для работы с многослойными флуоресцентными дисками. Возможно также не оптическое, а электрическое выделение слоёв с применением электрохромных (меняющих свои оптические свойства – пропускание, отражение – при приложении напряжения) материалов, таких как оксид вольфрама.

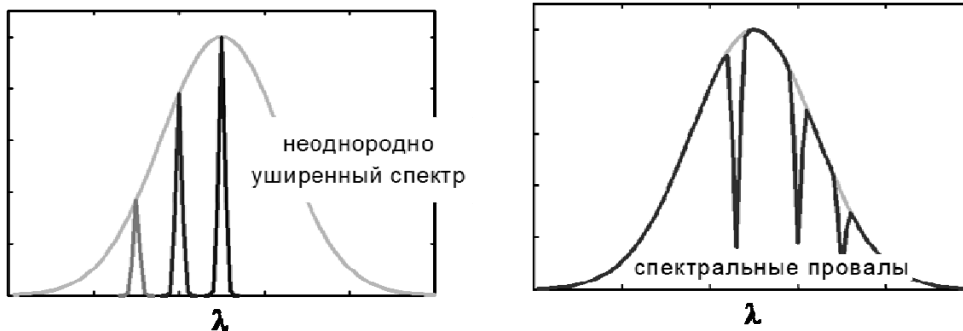


Рис.4. Реализация собственной **спектральной селективности** материала для оптической памяти за счёт выжигания стабильных спектральных провалов (persistent spectral hole burning). При воздействии узкополосного лазерного излучения на спектр ансамбля молекул, неоднородно уширенный до 1 ГГц – 10 ТГц из-за взаимодействия со средой при неэквивалентности различных пространственных локализаций, селективно возбуждаются подансамбли молекул, поглощающих узкополосное возбуждающее излучение, таким образом из широкого спектра изымаются узкие (100 Гц) полосы.

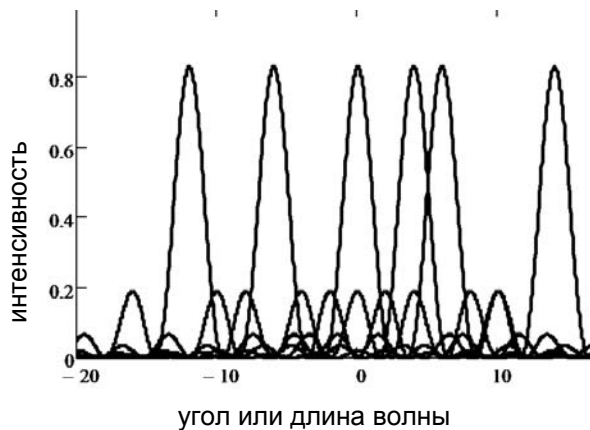


Рис.5. Мультиплексирование голограмм: угловая и связанная с ней спектральная селективность, присущие объёмной голограмме, позволяют реализовать раздельное обращение к различным блокам информации, записанным в одном объёме среды в виде наложенных голограмм, считывая её под разными углами или светом с разными длинами волн (угловое или спектральное мультиплексирование).

В разделах этого пособия, касающихся оптической памяти, будут кратко рассмотрены физические принципы хранения информации в него-

лографических (побитовых) оптических съёмных носителях (дисках), затем голографические системы и необходимые для них объёмные светочувствительные материалы.



## **Архивная оптическая память, оптические диски**

Наиболее ранний формат оптических дисков, основанный на патентах Дэвида Грегга (D.P. Gregg) 1961 и 1969 гг, был аналоговым. Первый вариант, изобретённый в 1958 г., работал в пропускающем режиме, в 1969 г. появились отражательные диски (Philips). В 1978 г. оптические диски с видеозаписью вышли на рынок (сначала США, потом Японии и Юго-Восточной Азии) и оставались там под различными торговыми названиями, наиболее известным из которых было "Laserdisc", до 2000-2001 гг, конкурируя вначале с магнитной записью (видеокассеты), а затем с цифровой оптической (CD, DVD). Лазерные диски были близки по размеру к грампластинкам (виниловым дискам), вмещающая примерно по 30 минут видеозаписи с каждой стороны. Для считывания с них информации использовались сначала гелий-неоновые, а позже диодные лазеры.

Современный этап развития оптической дисковой памяти связан с цифровыми дисками: DVD и Blu Ray имеют своим прямым родоначальником "компакт-диск" (compact-disc, CD); несколько в стороне находятся менее распространённые магнитооптические диски. Компакт-диски были разработаны как носители музыкальных записей примерно часовой длительности (CD-DA – "digital audio" , Philips и Sony, 1979-1981). С 1985 г. подобные диски стали использоваться для хранения компьютерной информации (программы, базы данных, и т.д.). Вначале были созданы диски, на которые информация наносилась при изготовлении без возможности её стирания или перезаписи (CD-ROM), далее была достигнута возможность пользовательской записи информации: однократной (recordable – CD-R, 1990 г.) или многократной, со стиранием (на основе магнитооптического механизма в CD-MO, 1988 г. и изменения фазового состояния в "перезаписываемых", rewritable, CD-RW, 1997 г.). Вслед за CD появились, также в модификациях с заводской записью информации и с возможностью одно- и многократной пользовательской записи, диски DVD (вначале сокращение от Digital Video Disc, затем Digital Versatile Disc), вмещающие несколько часов видеозаписи, сжатой по протоколу MPEG2, и далее диски Blu Ray (BR), чья информационная ёмкость достаточна для видео высокого разрешения. Скорости считывания информации с CD достигают 88 Мбит/с, с DVD – 259 Мбит/с, с Blu Ray – 432 Мбит/с. Форматы оптических дисков стандартизированы и описаны в так называемых "радужных книгах" (Rainbow books).

### **Конструкция оптических дисков и механизмы записи информации**

Основу оптических дисков CD, DVD, Blu Ray составляет слой полимера оптического качества (поликарбонат), на который нанесён металлический отражающий слой; считывающий луч лазера проходит через материал подложки и отражается от металла. Информация записывается от центра диска вдоль спиральной (или близкой к спиральной) дорожки в виде чередующихся участков с высокой и низкой отражательной способностью; при считывании информации переход от высокого уровня интенсивности отражённого света к низкому или наоборот воспринимается считывающей системой как логическая единица. Типичный диаметр дисков – 120 мм, толщина 1.2 мм.

Отражательный слой дисков, на которые информация наносится заводским способом (CD-, DVD-, BR-ROM – Read Only Memory), имеет расположенные вдоль спиральной дорожки углубления различной длины – питы (pits), при отражении от дна которых свет испытывает деструктивную интерференцию, поэтому они воспринимаются считывающей системой как тёмные участки (рис. 6).

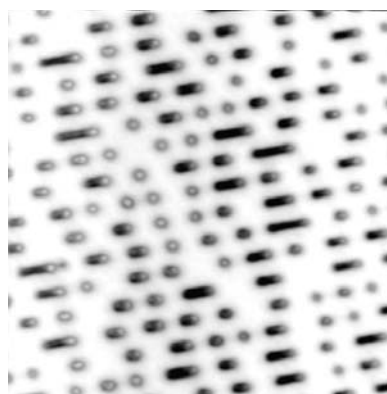


Рис.6. Микрофотография участка CD-ROM, сделанная в отражённом свете (конфокальный сканирующий микроскоп Zeiss LSM-710).

Изготовление таких дисков на примере CD-ROM включает следующие этапы:

1. запись мастер-диска на фоторезисте
2. изготовление никелевой пресс-формы (так же делали и виниловые диски)
3. сушка гранул поликарбоната специальной литьевой марки
4. плавление гранул при температуре около 300°C
5. литьё диска из полимерного расплава в пресс-форме под давлением (injection molding)

6. охлаждение
7. извлечение полимерного диска из формы (в реальности он выбрасывается из формы ещё мягким и твердеет, остывая в стопке таких же, как он, "блинов")
8. нанесение отражательного слоя на рельефную сторону диска
9. нанесение покровного (защитного) слоя на отражательный, его отверждение фотополимеризацией
10. печать изображения на покровном слое, упаковка

Качество дисков сильно зависит от выдерживания оптимальных режимов прессования (длительность этапов, температуры различных частей литьевой машины и формы), которые выбираются для каждой партии полимера.

Если число информационных слоёв в изготавливаемом диске превышает один, соответственно повторяется процедура нанесения отражательного слоя и покрытия; для двустороннего DVD добавляется склеивание двух дисков толщиной 0.6 мм отражательными слоями внутрь, для одностороннего – отштампованный диск с информационным слоем склеивается с диском из поликарбоната. Если изготавливается "записываемый" диск, то под отражательный наносится светочувствительный слой из органического красителя или металлического сплава, а впечатываемый рельеф содержит направляющую дорожку и пикеты служебной информации, в зависимости от типа диска.

К термопластичным полимерным материалам, из которых изготавливаются цифровые оптические диски, предъявляются очень жёсткие требования:

- прозрачность
- изотропность
- стабильность механических и оптических свойств
- однородность механических и оптических свойств
- устойчивость к механическим, тепловым, световым воздействиям

Требования ужесточаются при переходе от CD к DVD и далее к Blu Ray; последовательное изменение форматов дисков требовало разработки не только новых полупроводниковых лазерных источников, но и новых марок поликарбоната, способных к быстрому формированию оптически однородных пластин без заметных остаточных напряжений, чреватых оптической анизотропией (двулучепреломлением). Прогресс в полимерной оптике во многом обусловлен развитием технологии хранения информации в оптических дисках.

### Диски, предназначенные для записи информации пользователем

Диски, конструкция которых предусматривает возможность пользовательской записи информации, имеют спиральную направляющую дорожку, форма которой промодулирована волной с постоянной или переменной частотой (wobbling frequency) и амплитудой  $\sim 30$  нм. Пространственная модуляция спирали используется для синхронизации скорости вращения диска и записи служебной информации в некоторых вариантах дисков, например, в CD-R и CD-RW. В дисках с возможностью однократной записи между подложкой и отражательным слоем расположен тонкий слой красителя, прозрачность которого необратимо меняется в результате поглощения сфокусированного излучения записывающего лазера; изменённый микроскопический участок выполняет функции пита (рис. 7). Возможна запись информации на диск как за один, так и за несколько сеансов. Файловые системы, используемые для записи информации на оптических дисках и магнитных накопителях, различаются.

От свойств используемых красителей зависят необходимая для записи и считывания информации мощность лазера, скорость и надёжность передачи информации, длительность её хранения, необходимость защиты записей от света и тепла. Производители дисков внедрили различные светочувствительные красители, из которых наиболее известны:

- цианиновые (старые низкоскоростные CD зелёного цвета), их недостаток – чувствительность к УФ излучению
- азокрасители (синие)
- фталоцианиновые (желтые), близкие родственники играющих большую биологическую роль порфиринов, наиболее светочувствительны и пригодны для скоростной записи, стойки к УФ

Изменение рабочей длины волны и скоростей записи при переходе от CD к DVD заставили использовать модифицированные красители – азоцианины, цианины, хелаты металлов.

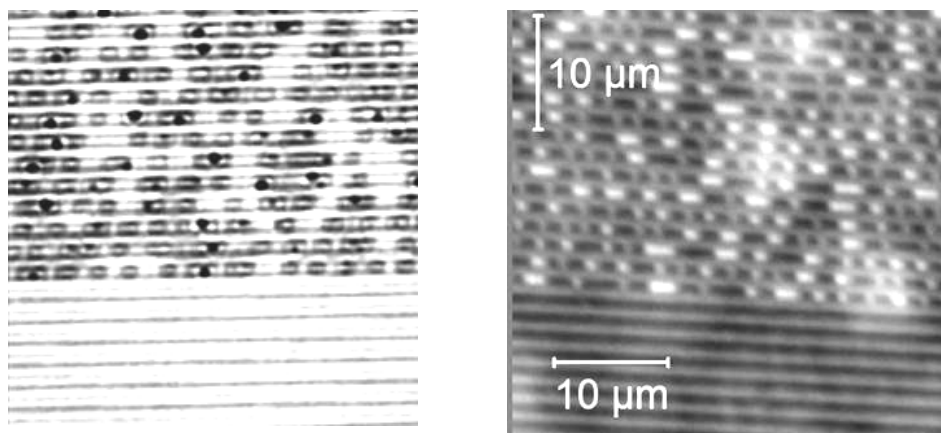


Рис. 7. Микрофотографии фрагментов двух различных дисков CD-R, на которых видны образовавшиеся при записи участки с изменённой прозрачностью (питы), следующие вдоль направляющих дорожек.

Диски DVD с возможностью однократной записи информации существуют в вариантах DVD-R и DVD+R, появившихся соответственно в 1997 и 2002 гг.; различие между ними состоит в том, что DVD+R используют, подобно CD-R, частотную модуляцию дорожки, а в DVD-R частота модуляции спиральной дорожки постоянна и адресация лазерного луча осуществляется с помощью впечатанных при изготовлении между дорожками питов; в DVD+R применяется более надёжная обработка ошибок. Конкуренция форматов +R и -R привела не к вытеснению какого-либо из них, а к их мирному сосуществованию; современные аппаратные и программные средства способны работать с обоими форматами.

#### Диски с возможностью многократной записи за счёт изменения фазового состояния информационного слоя

В дисках CD-RW, DVD+/-RW, DVD-RAM, UDO (Ultra Density Optical), BR-RE, допускающих возможность многократной записи и стирания информации за счёт изменения фазового состояния информационного слоя (phase-change), модуляция интенсивности отражённого света обеспечивается различием прозрачности в аморфном и кристаллическом состояниях расположенного перед зеркальным слоем сложного сплава (AgInSbTe, GeSbTe, GeSbTeN, GeSnSbTe, GeBiSbTe, GeBiTe или GeInSbTe). Фазовые переходы происходят за время порядка 10 нс благодаря локальному разогреву материала сфокусированным лазерным пучком (Рис. 8):

- запись: разогрев лазерным пучком выше температуры плавления (600°C) и быстрое охлаждение до температур, при которых кристаллизация не успевает произойти и сплав остаётся аморфным в течение очень длительного времени ( $10^8$ - $10^9$  с);

- стирание: разогрев ниже температуры плавления, но выше температуры ( $200^{\circ}\text{C}$ ), при которой кинетически возможно формирование микрокристаллов, затем охлаждение.

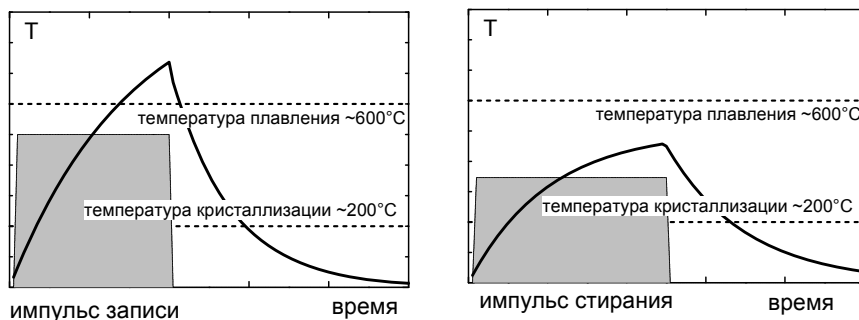


Рис.8. Принцип записи (слева) и стирания (справа) информации на основе изменения фазового состояния информационного слоя на дисках с возможностью перезаписи

Существующие стандарты предусматривают возможность как полного стирания информации с диска с последующей перезаписью, так и изменения отдельных файлов или групп файлов (пакетная запись).

Применяются несколько вариантов DVD с возможностью многократной записи на основе изменения фазового состояния информационного слоя: DVD+/-RW подобны по организации соответствующим дискам с однократной записью (в DVD+RW используется фазовая, а не частотная, модуляция формы дорожки), но DVD-RAM заметно отличаются от них. При изготовлении дисков DVD-RAM на них наносится фиксированная разметка на секторы в виде углублений, подобных питам DVD-ROM; запись осуществляется вдоль концентрических дорожек, а не спиральной, как на всех остальных оптических дисках. Несмотря на идентичность физических принципов записи информации на RW-диски и DVD-RAM, последние допускают в 100 раз больше циклов перезаписи – до 100000.

### Магнито-оптические диски

На несколько лет раньше, чем запись за счёт изменения фазового состояния, был реализован другой способ многократной записи информации на диски с использованием света – магнитооптический, использованный в компакт-дисках CD-МО, минидисках (MD). Как и при записи за счёт изменения фазового состояния, свет записывающего лазера используется для локального нагревания информационного слоя, состоящего из ферромагнитного материала. При температуре выше точки Кюри ( $200-300^{\circ}\text{C}$ ) во внешнем магнитном поле происходит изменение направления вектора на-

магнитности доменов разогретой области. Считывание информации осуществляется с использованием магнито-оптического эффекта Керра (изменения поляризации света при отражении от намагниченной поверхности). Магнито-оптические диски используют те же файловые системы, что и накопители на жёстких магнитных дисках. Как в магнито-оптических дисках, так и в дисках с записью за счёт изменения фазового состояния информация записывается при сильном локальном разогреве, а при гораздо более низких температурах хранения и эксплуатации практически не подвержена деградации, однако многократные локальные деформации, испытываемые светочувствительным сплавом при перекристаллизации, разрушают материал и сильно сокращают достижимое число циклов перезаписи.

В следующей таблице (табл. 1) сравниваются основные свойства магнитооптической записи и записи за счёт изменения фазового состояния (phase-change):

Табл.1. Сравнение механизмов записи на оптических дисках, допускающих перезапись: магнито-оптического и основанного на изменении фазового состояния (phase-change)

|                         | магнитооптика  | phase-change  |
|-------------------------|--|---|
| механизм записи         | изменение вектора намагниченности  | переход между аморфным и кристаллическим состояниями  |
| роль света              | локальный разогрев   |   |
| механизм считывания     | изменение поляризации отражённого света за счёт магнитооптического эффекта Керра | изменение интенсивности отражённого света из-за различия коэффициентов пропускания информационного слоя в кристаллическом и аморфном состояниях |
| характерные температуры | точка Кюри (200-300°C)   | ≈600°C – плавление<br>≈200°C – кристаллизация   |
| число циклов перезаписи | 10 <sup>6</sup>  | 10 <sup>3</sup> (CD-RW)<br>10 <sup>5</sup> (DVD-RAM)  |

#### **Повышение плотности записи информации на компакт-дисках**

Естественный предел информационной ёмкости оптических дисков устанавливает волновая оптика: элемент, считываемый/записываемый с

помощью дифракционно ограниченной оптики, не может иметь размеры в фокальной плоскости значительно меньше диаметра дифракционного пятна, или кружка Эри,  $d = 1.22\lambda/A$ , где  $A = n \cdot \sin\Theta$  – числовая апертура ( $n$  – показатель преломления,  $\Theta$  – максимальный угол падения световых лучей); реальным пределом разрешения является половина диаметра кружка Эри. Можно повысить плотность хранения информации, уменьшая длину волны записывающего/считывающего света или увеличивая числовую апертуру оптической системы, или используя несколько информационных и отражательных слоёв, доступ к которым осуществляется как с одной стороны диска (через первый полупрозрачный слой к лежащему под ним второму), так и с разных сторон. В этих направлениях и развивались форматы оптических цифровых дисков от CD к Blu Ray, что иллюстрируется табл. 2. Кроме существующих CD, DVD и Blu Ray, в таблице представлен и HD DVD (от High Definition, или High Density, DVD), побеждённый в "войне форматов" с Blu Ray.

Табл.2. Эволюция параметров цифровых оптических дисков: рабочая длина волны, числовая апертура, размеры, информационная ёмкость

| тип диска  | CD               | DVD             | HD DVD      | Blu Ray                          |
|--|------------------|-----------------|-------------|----------------------------------|
| годы применения                                    | с 1981           | с 1996-99       | 2006-2008   | с 2006                           |
| длина волны, нм                                    | <b>780</b>       | 635, <b>650</b> | <b>405</b>  | <b>405</b>                       |
| числовая апертура                                  | <b>0.45</b>      | <b>0.6</b>      | <b>0.65</b> | <b>0.85</b>                      |
| диаметр кружка Эри, мкм                            | 2.1              | 1.3             | 0.76        | 0.6                              |
| шаг дорожки, мкм                                   | 1.6              | 0.74            |             | 0.32                             |
| минимальная длина пита, мкм                        | 0.8              | 0.4             |             | 0.13                             |
| информационная ёмкость, Гбайт на слой              | 0.65 – (0.99)    | 4.7             | 15          | 25                               |
| число слоёв  | 1                | 1 или 2         | 1 или 2     | 1 или 2                          |
| число сторон                                       | 1                | 1 или 2         | 1 или 2     | 1 или 2                          |
| плотность информации, бит/мкм <sup>2</sup> на слой | <b>0.6-(0.9)</b> | <b>4</b>        | <b>13</b>   | <b>22</b>                        |
| медиа-вместимость                                  | 1-1.5 часа аудио | 2 часа видео    |             | 2 часа видео высокого разрешения |

#### Длина волны

Совершенствование оптических дисков от CD к DVD проходило с почти двукратным уменьшением длины волны используемого света, от ближнего ИК диапазона к самой границе между видимым и УФ диапазо-



нами, которое стало возможным благодаря прогрессу в лазерной технике и обеспечило увеличение плотности хранения информации в  $(780/405)^2 \approx 3.7$  раза. Мыслимы, но пока не реализованы из-за сложностей с лазерами, прозрачными в соответствующей спектральной области оптическими материалами уменьшение длины волны ещё в два раза, до границы вакуумного УФ (200 нм), и соответствующий четырёхкратный рост плотности записи. Но если использовать в дисках, подобных CD, например, рентгеновское излучение с длиной волны порядка 1 нм, то плотность записи превысила бы существующую уже на 4-5 порядков!

### Многослойные диски

Хотя ограниченное дифракцией пространственное разрешение вдоль оси пучка (перпендикулярно поверхности диска), составляющее  $4\lambda/\Lambda^2$ , казалось бы, позволяет разместить в диске очень большое число информационных слоёв (более 70 для CD) и в экспериментальных образцах реализованы 16-слойные диски типа Blu Ray (Pioneer, 2008), используемые на практике диски содержат не более двух слоёв с каждой стороны.

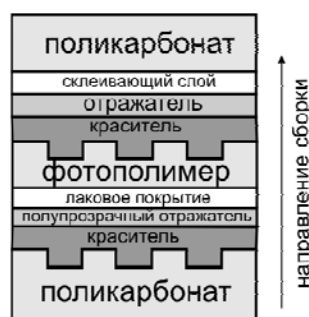


Рис.9. Структура двуслойного диска DVD-R (без соблюдения масштаба толщины). На рисунке показана половина диска. Двусторонний двуслойный диск состоит из двух таких половин, в одностороннем половине толщины занята поликарбонатной подложкой. Запись и считывание информации производятся снизу.

Проблемы порождаются, в частности:

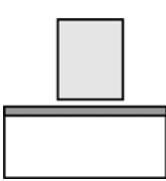
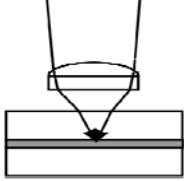
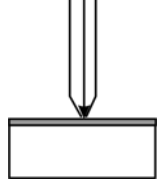
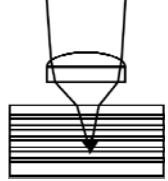
- интерференцией пучков, отражённых от параллельных зеркальных слоёв,
- необходимостью одновременно высоких отражения света каждым зеркальным слоем к считывающей системе и пропускания света к следующим информационным слоям, сложностью сборки многослойной конструкции диска (на рис. 9 для примера показана структура диска лишь с двумя информационными слоями).

Возможность действительно многослойных дисков открывает флуоресцентная технология, не нуждающаяся в отражательных слоях.

### Числовая апертура, ближнее поле

Повышение информационной плотности за счёт уменьшения размеров светового пятна возможно в режиме ближнего поля, подразумевающим расстояние между оптической системой и носителем информации много меньше длины волны (10-20 нм). В одном варианте размер пятна задаётся диаметром выходного отверстия световода, подведённого почти вплотную к поверхности диска; в другом свет фокусируется внутри линзы с высоким показателем преломления, находящейся очень близко от поверхности ("твёрдая иммерсия", solid immersion) – таким образом достигается очень большая числовая апертура и, следовательно, малый размер светового пятна. В обоих случаях достигается выигрыш в несколько раз в плотности записи (50-75 ГБ на диск, Sony, Philips, 2006), но за счёт утраты важного преимущества оптических методов перед магнитным – бесконтактности. Табл. 3 показывает присущие различным оптическим системам плотности записи информации и зазоры между записывающей/считывающей системой и носителем информации в сравнении с магнитной.

Табл.3. Различные формы записи информации, присущие им плотности записи и типичные зазоры между носителем информации и оптической / магнитной системой

| вид записи                             | магнитная   | однослойная оптическая  | ближнеполюсная оптическая   | многослойная оптическая  |
|--|---|---|---|--|
|  |  |  |  |  |
| зазор                                  | 5-10 нм   | ~1 мм   | 20 нм   | ~1 мм  |
| плотность записи, бит/мкм <sup>2</sup> | > 50  | 0.6-22  | 50  | > 100  |

Повышение числовой апертуры оптической системы означает приближение оптической системы к информационному слою и информационного слоя – к поверхности диска (рис. 10). Так, если в CD свет проходит на пути к информационному слою почти всю толщину диска, то в DVD информационный слой находится в середине, в дисках Blu Ray – почти на

поверхности, а в ближнепольных дисках – непосредственно на поверхности.

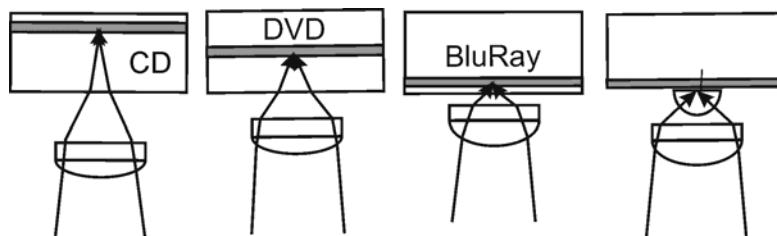


Рис.10. Варианты оптической записи информации с различными числовыми апертурами (в скобках): CD (0.45), DVD (0.6), Blu Ray (0.85), ближнепольная с твёрдой иммерсией (2)

Заметим, что увеличение плотности записи в 24-36 раз, достигнутое в развитии технологии цифровых оптических дисков от CD к Blu Ray, заметно превосходит множитель  $1.9^4 \approx 13$ , которого можно было бы ожидать от простого уменьшения размера светового пятна за счёт уменьшения длины волны и увеличения числовой апертуры в 1.9 раза. Следует также иметь в виду, что не вся "геометрическая" ёмкость диска доступна непосредственно для хранения пользовательской информации; часть её используется для обнаружения и исправления ошибок, и от этого доступный для записи объём информации может зависеть очень сильно. Так, в декабре 2009 г. появились сообщения о планах по увеличению ёмкости слоя дисков Blu Ray с 25 до 32 ГБ с помощью нового протокола коррекции ошибок.

Таким образом, увеличение информационной ёмкости оптических дисков достигается путём:

- уменьшения длины волны записи/считывания,
- увеличения числовой апертуры оптической системы,
- снятия дифракционных ограничений в режиме ближнего поля,
- увеличения числа информационных слоёв диска,
- совершенствования протокола обработки информации.

Разрабатываются и более экзотические варианты повышения информационной ёмкости, в которых помимо длины волны, варьируется его глубина или наклон дна. Применительно к магнито-оптической записи плотность записи может быть повышена сверх дифракционно ограниченной в так называемом режиме "магнитного сверхразрешения" (magnetic super-resolution), в котором нагрев выше критической температуры и, следовательно, изменение намагниченности происходят в малой центральной области гауссова светового пучка, а для оптического считывания возбуждение переносится на дополнительный магнитный слой диска. Возможность

оптического "сверхразрешения" связывается также с применением метаматериалов.

### Длительность хранения информации на компакт-дисках

Реальное время хранения информации на оптических дисках зависит от стойкости составляющих их элементов – материалов отражающего и информационного слоёв, полимерной основы, лакового покрытия – к естественному старению и воздействию внешних факторов, таких как тепло, УФ излучение, влажность, кислород. Видимо, главным условием сохранности информации является качественная сборка диска, предохраняющая его внутренние элементы от контакта с окружающей средой. Хотя многие записи становятся нечитаемыми уже через год после их создания, в целом конструкция дисков и коррекция ошибок обеспечивают сохранность информации в течение нескольких лет даже при заметном разрушении элементов диска. На рис. 11 приведена микрофотография участка отражающего слоя диска CD-R, видимое разрушение которого коррозией не помешало информации остаться доступной для чтения через 10 лет после записи.

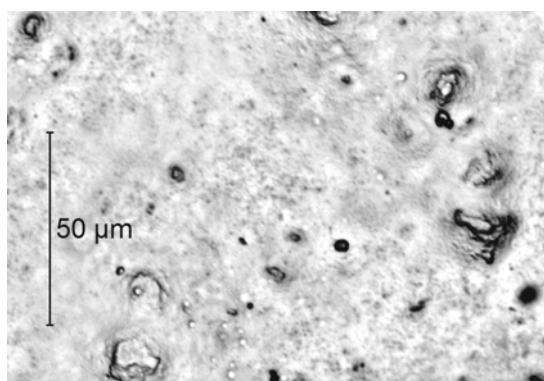


Рис.11. Микрофотография разрушенного коррозией участка отражательного слоя CD-R.

Производители дисков указывают срок их службы в 50 - 200 лет; часто эти оценки основываются на экстраполяции данных по деградации отдельных элементов дисков, полученных за относительно короткое время при повышенных температурах, с использованием аррениусовской зависимости  $k = k_0 \exp(-E/RT)$ . На рис. 12 показаны такого рода зависимости времени жизни красителей от температуры:

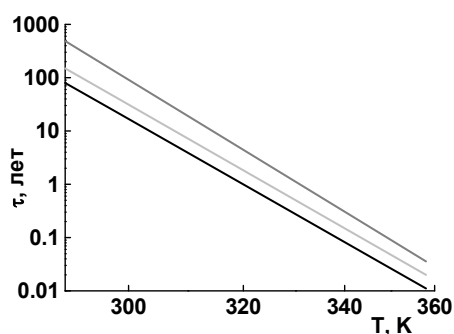


Рис.12. Оценка сроков службы различных красителей, применяемых в компакт-дисках с возможностью однократной записи (CDR, DVD+/-R), при различных температурах

Из известных красителей наиболее высокую устойчивость к УФ излучению и теплу проявляет фталоцианин (ФЦ). За годы широкого распространения оптических дисков красители были значительно улучшены и их устойчивость более не является критическим фактором.

Отражающий (зеркальный) слой дисков изготавливается из алюминия, золота, серебряных сплавов. Золото наиболее инертно, но избыточно и дорого; качество серебряных сплавов вполне достаточно, при условии хорошего лакового покрытия. При недостаточной защите серебряный слой страдает от серы и кислорода. Высокая устойчивость зеркального слоя обеспечивается и его равномерной мелкозернистой структурой. Алюминиевый сплав значительно дешевле, чем серебряный, а в остальном не хуже и не лучше, применительно к дискам для многократной записи и дискам с информацией, нанесённой в виде рельефных питов. В дисках для однократной записи алюминий не применяется, так как он бы корродировал, химически взаимодействуя с красителями. Зеркальный слой DVD делается толще, чем у CD, в частности, с целью улучшения теплоотвода.

Неорганический сплав перезаписываемых дисков в принципе более стабилен к УФ излучению и нагреву, чем органический краситель, однако и рабочие температуры, которые ему приходится неоднократно выдерживать, намного выше. Слой может быть повреждён влагой, если она к нему проникнет через недостаточно хорошо заделанные края. Срок службы предположительно не менее срока службы дисков с однократной записью, а возможно и превосходит его.

Конструкция дисков. Наиболее легко повреждаемый её элемент – тонкое лаковое покрытие металлического слоя CD. Поликарбонатная основа CD и отчасти DVD достаточно толста для предотвращения проникновения паров и газов через неё, а её механические повреждения не сказываются фатально на доступе к информации, так как на поверхности слоя ла-

зерный пучок, фокусируемый на информационном слое, ещё достаточно широк (рис. 13), а питы и расстояния между витками дорожки сравнительно велики.

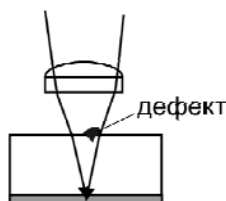


Рис.13. Иллюстрация оптической причины нечувствительности записи на компакт-диске к дефектам поверхности

Приближение информационного слоя к поверхности CD – DVD – Blu Ray снижает требования к оптическому качеству материала основы (отчасти компенсируя ужесточение этих требований, вызываемое уменьшением размеров элементов записи – питов – и расстояний между ними), но повышают чувствительность записанной информации к дефектам поверхности. Диски Blu Ray для предохранения от царапин имеют специальное твёрдое покрытие, а до его внедрения заключались в защитный чехол (картридж).

В отличие от дисков CD и Blu Ray, зеркальный и информационный слои DVD расположены в середине толщины диска, что обеспечивает лучшую их защиту – как в механическом, так и в оптическом смысле. Проблемы могут порождаться слоем, соединяющим половины диска. Если соединение недостаточно плотно, в него могут проникать влага, кислород и другие нежелательные вещества.

### Флуоресцентные диски

Использование флуоресценции для считывания информации с цифровых оптических дисков позволяет исключить из их конструкции отражающие слои, так как на фотоприёмник считывающей системы должен попадать не отражённый зондирующий свет, интенсивность которого промодулирована рельефом зеркала или коэффициентом пропускания слоя, находящегося перед зеркалом, а излучение, испускаемое расположенными в толще диска и выполняющими роль питов скоплениями флуоресцирующего красителя при попадании на них сфокусированного считывающего пучка. Флуоресцирующие питы могут быть как внесены в заданные места диска при его изготовлении (аналог RAM-дисков), так и образованы в результате обратимой или необратимой фотохимической трансформации исходно не флуоресцирующего вещества диска при попадании на него сфокусированного излучения записывающего лазера.

Достоинства флуоресцентных дисков:

- прозрачность, дающая возможность реализовать действительно многослойную систему,
- некогерентность излучения, отсюда отсутствие интерференционных помех,
- сдвиг флуоресцентного отклика по длине волны от опрашивающего излучения – отсюда возможность отстройки от рассеянного света,
- возможность использования форматов, совместимых с DVD.

Разработанные варианты флуоресцентных многослойных дисков известны под названиями HyperCDROM (10-100ГБ), Fluorescent Multilayer Disc - FMD, Digital Multilayer Disk – DMD (22-32 , потенциально до 100 ГБ). Характеристики 12-слойного FMD приведены в Табл.4 в сравнении с характеристиками DVD; структура диска схематично отображена на рис. 14.

Для записи информации в дисках с флуоресцентным считыванием эффективно применена двухфотонная запись, обеспечивающая точную адресацию и отсутствие чувствительности к фоновой засветке. Продемонстрирована запись 253 ГБ информации в 300 слоёв, что соответствует весьма скромной (как в CD) плотности информации внутри слоя; за счёт огромного количества слоёв в дисках стандартного размера (диаметр 120 мм, толщина 1.2 мм) может быть записано порядка 1 ТБ информации.

Табл.4. Сравнение дисков DVD и FMD

|                             | DVD-ROM | FMD-ROM |
|-----------------------------|---------|---------|
| информационная ёмкость, ГБ  | 5/9/17  | 50      |
| скорость считывания, Мб/с   | 10      | 1000    |
| число слоёв                 | 1/2/4   | 12      |
| шаг спиральной дорожки, мкм | 0.74    | 0.8     |
| длина волны, мкм            | 0.65    | 0.53    |

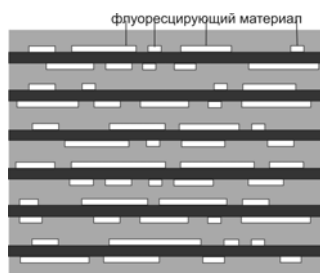


Рис.14. Структура многослойного флуоресцентного диска

Своеобразным мостом между побитовыми системами хранения информации и голографической памятью, которая будет рассмотрена в следующем разделе, является подход, основанный на использовании микроголограмм (рис.15), каждая из которых несёт не страницу, а бит информации, но благодаря брэгговской селективности может быть записана в одном объеме с множеством других и затем считана отдельно от них. Такой способ записи информации разрабатывается специалистами Института автоматизации и телеметрии Сибирского Отделения РАН, Берлинского технического университета, Sony (Sony micro-reflector).

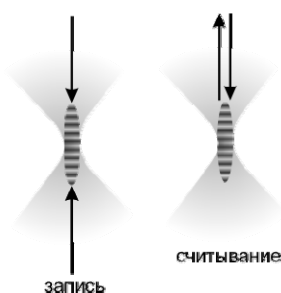


Рис.15. Схема записи и считывания отражательных микроголограмм



## Голографические системы записи и хранения информации. Принцип действия и устройства

Плотность записанной информации, т. е. объем информации, приходящейся на единицу площади носителя – одна из главных характеристик запоминающего устройства. Для оптических систем записи информации принципиальным ограничением плотности записи на поверхности оптического диска является дифракционный предел, обусловленный волновой природой света и определяющий минимальный размер пятна в фокусе записывающей/считывающей оптической системы. Согласно теории оптическое излучение может быть сфокусировано в пятно с размером  $\sim \lambda/2$  (где  $\lambda$  – длина волны света). Это значит, что максимальная плотность записи оптической информации может достигать порядка  $4/\lambda^2$ , то есть более  $10^9$  бит/см<sup>2</sup>. При увеличении объема и плотности записи информации неизбежно возникает необходимость увеличения скорости поиска и выборки нужной части информации. Поиск новых возможностей увеличения информационной плотности записи и скорости выборки информации ведется по многим направлениям, в том числе в области голографии, которая, в силу своих специфических свойств, является одним из наиболее перспективных кандидатов на создание высокоэффективных систем записи и хранения информации.

Использование голографического метода для хранения информации было предложено впервые в 1963 г. Ван Хирденем. Как известно, голографический принцип записи состоит в регистрации одновременно объектной (несущей информацию об объекте) и опорной волн. При этом в результате сложения взаимно когерентных опорной и объектной волн происходит преобразование фазовых соотношений в амплитудную структуру интерференционной картины. Регистрация этой интерференционной картины на голографическом оптическом диске и приводит к записи голограммы (рис.16). Изменения в материале голографического диска могут быть в виде модуляции поглощения, показателя преломления или толщины. Прогресс в разработке голографических систем хранения информации связан в основном с развитием современных технологий, позволяющих производить относительно дешевые устройства ввода/вывода информации, а также успехами в разработке новых регистрирующих сред для голографической записи.

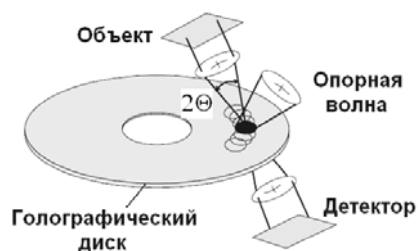


Рис.16. Принцип голографической записи информации

### Особенности голографического метода записи информации

- 1) Голографический метод позволяет создавать трехмерное пространственное изображение объекта, которое не может быть создано в такой же степени каким-либо другим способом.
- 2) При голографической записи можно использовать для хранения информации не только поверхность, но и объем записывающего материала, что значительно увеличивает плотность записи, поскольку угловая и спектральная селективность объемных голограмм позволяет осуществлять многократную запись информации на один и тот же участок регистрирующего материала.
- 3) Голографический метод позволяет регистрировать прозрачные объекты, в которых отдельные части отличаются не коэффициентом пропускания и отражения, а изменением показателя преломления или толщины объекта, влияющим на изменение длины оптического пути.
- 4) При восстановлении волнового фронта с голограммы можно получить действительное изображение объекта с максимальным разрешением не только в поперечном, но и продольном направлениях. Такая особенность голографического метода применяется, например, при измерении размеров микрочастиц в аэрозолях, при изучении биологических объектов и для более общих задач микроскопии.
- 5) Опорная волна, образуемая вместе с объектной волной интерференционную картину, может быть модулирована в результате прохождения через специальную маску. Восстанавливаться изображение будет только при прохождении опорного пучка через такую же маску. Это свойство может быть использовано, например, в устройствах с фазово-кодированным мультиплексированием.
- 6) Голографический метод позволяет осуществлять суперпозицию интерференционных полей. В связи с этим можно получить интерферограмму не только от двух (или более) одновременно существующих объектов, но также от объектов, голографируемых в разное время, в том числе и одного, изменяющегося во времени объекта. Это свойство голографической записи привело к созданию голографической интерферометрии, методы которой

позволяют изучать не только деформации объектов, но также фазовую структуру прозрачных объектов.

7) Голографический метод позволяет реализовать свойство ассоциативности голограмм, заключающееся в том, что при освещении голограммы частью объектного пучка, восстанавливается опорная волна, соответствующая той, которая была использована при записи данного объекта.

8) Голографический метод позволяет реализовать так называемую распределенную запись информации, что повышает надежность записи и считывания. Это свойство наиболее ценно при создании голографических систем памяти.

Перечисленные особенности голографического метода в той или иной степени используются и в устройствах голографической памяти.

**Преимущества голографической памяти** по сравнению с другими (в том числе и оптическими) методами записи/считывания заключаются в следующем:

1. **Высокая плотность записи** (теоретически до  $10^{12}$  бит/см<sup>2</sup>). Следует отметить, что реально достижимые в настоящее время величины плотности записи существенно ниже, что связано с рядом принципиальных ограничений, связанных с угловой селективностью материала, его динамическим диапазоном и т.д., однако в научных лабораториях уже получены значения около 40 Гбит/см<sup>2</sup>.
2. **Высокая скорость записи/считывания.** Поскольку каждая из голограмм одновременно воспроизводит все записанные в ней данные, это позволяет существенно увеличить не только скорость записи, но и считывания информации с оптического голографического диска. Поэтому, голографические системы памяти могут быть легко интегрированы для взаимодействия с оптическими компьютерами, где реализуется принцип параллельности обработки информации. Параллельный доступ ко всей информации, хранящейся в голографическом запоминающем устройстве, делает возможным извлечение полезной информации за время одного периода обращения, то есть существенно уменьшается время считывания. В настоящее время скорость «оптического» считывания информации в голографических системах памяти достигает 10 Гбит/сек, а с учетом перевода информации в электронный вид – около 1 Гбит/сек.
3. **Высокая помехозащищенность записи.** Особенностью голографического метода записи является то, что при записи большого числа объектных волн (каждая из которых в нашем случае представляет один бит информации) каждая из этих волн распределена по всей площади голограммы. Таким образом, повреждение или утрата части голограммы будет приводить лишь к уменьшению уровня сигнала при её считывании, не нарушая при этом целостности картины восстановленных объектных волн. По этой причине, распределенная (гологра-

фическая) запись является принципиально гораздо более устойчивой к появлению каких-либо ошибок или сбоев в канале считывания.

4. Возможность реализации алгоритмов поиска данных с использованием **свойства ассоциативности** голографического метода записи. Ассоциативность голограммы означает, что при освещении голограммы частью объектного пучка, восстанавливается опорная волна, соответствующая той, которая была использована при записи данного объекта. Таким образом, если какая-то часть информации (в объектном пучке) является общей для некоторого числа записанных голограмм, то, наиболее отвечающей критериям поиска, будет та из них, для которой восстановленная опорная волна является наиболее интенсивной. Выбирая наиболее интенсивную из восстановленных частью объектной волны опорную волну, можно полностью восстановить искомую объектную волну (информацию).
5. Возможность проведения различных **логических и математических действий** между различными массивами. Голографический метод записи и считывания позволяет реализовать выполнение основных операций булевой алгебры (И, ИЛИ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ и т.д.). Также возможно выполнение параллельных ассоциативных операций, таких, как поиск данных, детектирование изменений, корреляция и распознавание образов.
6. Запись и считывание информации возможны в **реальном времени**. Голографический метод записи позволяет осуществить практически мгновенное считывание (при условии использования соответствующих регистрирующих материалов).

Устройства хранения информации могут подразделяться на типы скоростью записи/считывания и объему памяти. Различают следующие основные **типы устройств памяти**:

1. Архивная память – в этом случае наиболее важной характеристикой является возможность максимально большого объема памяти. Не требуется запись в процессе эксплуатации.
2. Частично-заменяемая память – тип памяти с преимущественным считыванием и с возможностью перезаписи.
3. Быстродействующая реверсивная память – тип памяти относительно небольшого объема, предполагающий высокую скорость записи, считывания и стирания информации.

Голографическое запоминающее устройство, как всякое другое запоминающее устройство, в наиболее общем виде должно реализовать следующие процессы:

- 1) Кодирование или преобразование сигнала, несущего информацию в форму, удобную для записи;
- 2) Распределение информации по носителю и запись;
- 3) Хранение информации;

- 4) Нахождение нужной информации на носителе;
- 5) Декодирование или преобразование в форму, удобную для вывода;
- 6) Вывод информации из запоминающего устройства для использования потребителем;
- 7) Если устройство хранения не относится к архивному типу, необходимо осуществить стирание и повторную запись.

Голографический метод записи наиболее полно реализуется в устройствах архивной памяти (например, голографические диски большой емкости), а также в устройствах быстродействующей реверсивной памяти (с использованием электрооптических или фотохромных кристаллов).

Системы голографической памяти можно классифицировать **по методу записи и считывания голограмм:**

- 1) *Последовательная запись.* Вся информация в виде большого количества отдельных изображений (бит) записывается на одну и ту же голограмму. Изображения (биты) восстанавливаются независимо друг от друга, если при их записи использовались опорные волны, различающиеся между собой.
- 2) *Параллельная запись.* Запись осуществляется сразу большими массивами (массив  $N$  бит). Запись информации массивами представляется наиболее перспективной для достижения высокой ёмкости, особенно в сочетании с последовательной записью  $M$  голограмм, записанных с использованием опорных волн, различающихся между собой.
- 3) Запись информации, распределенной по глубине (в объёме). В этом случае различные массивы распределены по глубине регистрирующей среды. Такую запись информации можно комбинировать с последовательной записью с целью увеличения плотности хранимой информации. При считывании изображений предъявляются высокие требования к оптико-механической части устройства.

В системах голографической памяти могут использоваться как тонкие, так и объёмные голограммы. Для их различения используется так называемый критерий Клейна  $Q = 2\pi\lambda d/(n\Lambda^2)$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения,  $d$  - толщина голограммы,  $n$  - средний показатель преломления,  $\Lambda$  - пространственный период. Если  $Q > 10$ , то голограмма считается объёмной. Пространственный период решетки  $\Lambda$  определяется длиной волны при записи и углом между объектной и опорной волнами:  $\Lambda = \lambda / (2 \times \sin\theta)$ , где  $\theta$  - половина угла между опорной и объектной волнами (в воздухе). Благодаря присущему объёмным голограммам свойству спектральной и угловой селективности, возможны запись и раздельное считывание многих голограмм в одном объёме (мультиплексирование), что повышает плотность хранения информации.

Максимальная дифракционная эффективность  $\eta$  (до 100%) достигается в случае объёмных фазовых голограмм. Выражение для дифракционной эффективности  $\eta$  объёмных фазовых голограмм пропускающего типа записывается как:

$$\eta = \sin^2(\pi n_1 d / \lambda \cos \theta_i),$$

где  $n_1$  – амплитуда модуляции показателя преломления,

$d$  – толщина голограммы

$\theta_i$  – половина угла между опорной и объектной волнами (в среде)

Таким образом, объемные фазовые голограммы характеризуются наибольшей потенциальной емкостью хранения информации.

Проводимые в течение десятков лет (с 1963 года) исследования в области создания систем голографической памяти привели к пониманию основных принципов действия таких устройств:

1. Информацию следует записывать (и хранить) в виде двоичного кода, а не в аналоговой форме.
2. Предпочтительно одновременно записывать массив данных (страницу или матрицу), что позволяет существенно (на порядки) увеличить скорость записи/считывания.
3. По типу используемых голограмм наибольшим преимуществом пользуются Фурье-голограммы, регистрируемые в плоскости Фурье-преобразования или вблизи ее, так как они могут быть записаны на малых площадях и инвариантны к поперечному сдвигу относительно опорного пучка. Инвариантность к сдвигу существенно упрощает требования к установке фотоприемника, воспринимающего восстановленное изображение при считывании.
4. Для записи следует использовать объемные среды, позволяющие реализовать селективные свойства голограмм и, соответственно, увеличить плотность записи информации.
5. В системе голографической памяти не должно быть движущихся частей. Только в этом случае можно обеспечить максимальную надежность и быстродействие всей системы.

Пример оптической схемы для реализации голографической системы хранения информации в объемной среде приведен на рис.17. В режиме записи (рис.17а) излучение лазера проходит через электрооптический затвор 2 и попадает на вращатель поляризации 3, после чего отклоняется на заданный угол дефлектором 4. Поляризационный делитель делит пучок на две части с одинаковой поляризацией (обозначена кружком). Одна часть пучка направляется на матрицу микролинз, которая совместно с объективом 5 формирует равномерную засветку устройства ввода информации 9, расположенное в фокусе линзы 10, осуществляющей преобразование Фурье. С противоположной стороны линзы 10 также в фокусе помещен регистрирующий материал 11 для записи голограмм. Вторая часть лазерного пучка проходит систему линз и объективов и направляется на угловой дефлектор 13, который совместно с дифракционной решеткой 14 предназначен для изменения угла наклона опорного пучка для многократной записи

**Примечание [A1]:** По-моему, этот фрагмент надо переформулировать, ведь 100% эффективности для памяти не требуются. В соседних формулах разные обозначения.

голограмм на одном и том же участке регистрирующего материала. Для перехода на следующий участок записи изменяется угол отклонения пучка с помощью акустооптического дефлектора 4, при этом одновременно изменяется положение и опорного и объектного пучков.

В режиме считывания (рис.17б) поляризация лазерного излучения меняется на ортогональную (обозначена стрелкой), при этом излучение лазера проходит поляризационный светоделитель без отражения, формируя пучок, аналогичный опорному пучку при записи. Изменяя угол падения пучка с помощью углового дефлектора 13 можно осуществлять считывание информации восстановленной голограммой с помощью устройства считывания 12. Для перехода на следующий участок голографического материала изменяется угол отклонения пучка с помощью акустооптического дефлектора 4, а затем производится выборка нужной информации изменением угла считывания при помощи углового дефлектора 13.

Проводимые с 1963 года исследования в области создания систем голографической памяти привели к пониманию основных принципов действия таких устройств:

- 1) Информацию следует записывать (и хранить) в виде двоичного кода, а не в аналоговой форме.
- 2) Предпочтительно одновременно записывать массив данных (страницу или матрицу), что позволяет существенно (на порядки) увеличить скорость записи/считывания.
- 3) По типу используемых голограмм наибольшим преимуществом пользуются фурье-голограммы, регистрируемые в плоскости фурье-преобразования или вблизи ее, так как они могут быть записаны на малых площадях и инвариантны к поперечному сдвигу относительно опорного пучка. Инвариантность к сдвигу существенно упрощает требования к установке фотоприемника, воспринимающего восстановленное изображение при считывании.
- 4) Для записи следует использовать объемные среды, позволяющие реализовать селективные свойства голограмм и, соответственно, увеличить плотность записи информации.
- 5) В системе голографической памяти не должно быть движущихся частей. Только в этом случае можно обеспечить максимальную надежность и быстродействие всей системы.

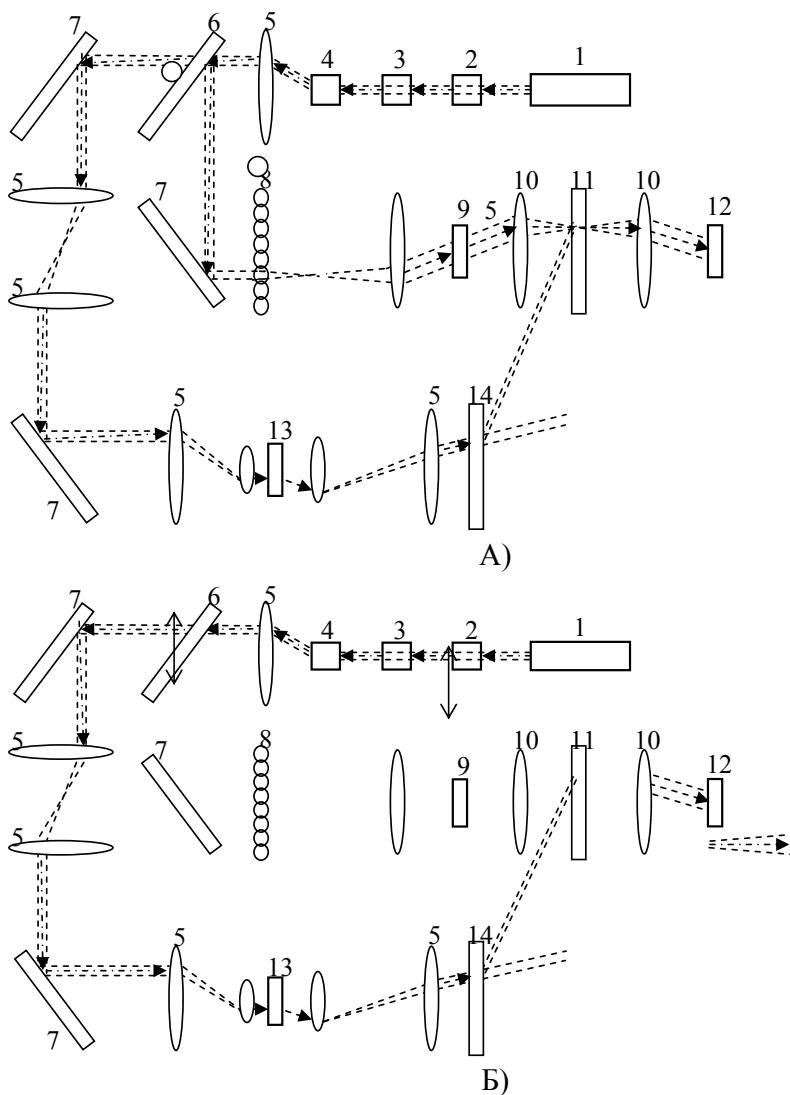


Рис.17. Оптическая схема реализации голографической памяти с изменяющимся углом падения опорного пучка в объемной среде в режиме записи (А) и считывания (Б) информации.  
 1 – лазер, 2 – электро-оптический затвор, 3 – вращатель поляризации, 4 – акусто-оптический дефлектор, 5 – линза, 6 – поляризационный светоделитель, 7 – селективное зеркало, 8 – матрицы микролинз, 9 – устройство ввода информации, 10 – линза фурье-преобразования, 11 – регистрирующая среда, 12 – устройство считывания информации, 13 – угловой дефлектор, 14 – дифракционная решетка.



## Компоненты голографической памяти

### Источник излучения

Для обеспечения эффективной записи голограмм требуется коллимированное когерентное излучение лазера. Для обеспечения высокой пиковой мощности желательно использовать импульсный лазер с высокой частотой повторения импульсов (до  $10^6$  импульсов в секунду). Большинство используемых регистрирующих материалов имеют наибольшую чувствительность в сине-зеленом диапазоне, однако и при этом условии средняя мощность излучения лазера в одномодовом режиме генерации должна составлять около 1 Вт. В первых экспериментах по созданию голографических систем памяти использовали в основном излучение Ar-лазера на длинах волн  $\lambda=0.488$  и  $0.515$  мкм. Однако, коэффициент преобразования электрической энергии в оптическое излучение крайне низок (порядка 0.1%), поэтому габариты таких лазеров и их блоков питания довольно громоздки. В настоящее время широко используются твердотельные неодимовые лазеры ( $\lambda_1=1.053\dots 1.070$  мкм) с диодной накачкой и преобразованием частоты излучения во вторую гармонику с длиной волны  $\lambda_2=0.527\dots 0.535$  мкм. Следует также помнить, что использование лазеров с генерацией излучения на более коротких длинах волн обеспечивает увеличение плотности записи информации пропорционально  $\lambda^{-3}$  (в случае объемной регистрирующей среды).

### Дефлектор лазерного излучения

Для точного позиционирования лазерного излучения на поверхности и в объеме голографической регистрирующей среды нужно использовать быстродействующие устройства-дефлекторы (желательно не механического типа), способные изменять направление распространения падающего лазерного излучения. В основном, используют гальванометрические (механические) и оптические (акустооптические и электрооптические) дефлекторы. Быстродействие гальванометрических дефлекторов относительно велико и составляет  $t\sim 0.1$  мс. В случае акустооптического дефлектора отклонение пучка лазерного излучения происходит на акустической волне, созданной в акустооптическом материале с помощью пьезоэлектрического преобразователя. Изменение несущей акустической частоты приводит к изменению периода решетки и, следовательно, к изменению угла дифракции лазерного излучения на этой решетке. Быстродействие таких устройств определяется, главным образом, временем прохождения звуковой волны через сечение лазерного пучка и может составлять величину  $t\sim 10^{-6}-10^{-5}$  с. В случае электрооптического дефлектора отклонение пучка лазерного излучения происходит в электрооптическом кристалле при приложении

к нему электрического поля. Быстродействие электрооптического дефлектора составляет  $t \sim 10^{-6}$  с.

### Устройство ввода информации

Устройство ввода служит для преобразования цифровых электрических сигналов в матрицу данных, которая помещается на пути объектного пучка, модулируя его в соответствии с заданным распределением сигналов на этой матрице (0 или 1 в двоичном коде). Устройство ввода информации должно обеспечивать:

- 1) высокое быстродействие (желательно с  $t \sim 10^{-6}$  с)
- 2) высокое разрешение (размер каждого элемента матрицы менее 100 мкм)
- 3) большое количество элементов (1024×1024 элемента)
- 4) высокий контраст изображения (100:1 и выше)
- 5) стабильность свойств по отношению к мощному лазерному излучению (до 1 Вт)
- 6) высокая однородность по яркости и контрасту по всей площади матрицы

Наиболее широкое применение находят жидкокристаллические (ЖК) матрицы с разрешением до 1024×1024 элемента. Для пространственной модуляции света используют два электрически управляемых эффекта, наблюдающихся в жидких кристаллах: наведённое двулучепреломление и динамическое рассеяние света. Процесс изменения оптических свойств слоя жидкого кристалла носит пороговый характер. Конструкция ячейки транспаранта представляет собой сэндвич, состоящий из плёнки жидкого кристалла между двумя электродами, напылёнными на стеклянных подложках и обычно прозрачными. Эффект динамического рассеяния применяют для амплитудной модуляции проходящего или отражённого светового пучка. Он обусловлен переносом заряда через слой жидкого кристалла и возникновением в нём гидродинамических неустойчивостей. Перемешивание в электрическом поле приводит к значительному ослаблению интенсивности проходящего через ячейку света. По окончании действия электрического поля слой приобретает исходную структуру и становится прозрачным. Под действием электрического поля в жидком кристалле происходит также процесс переориентации молекул (В- и S-ориентационные полевые эффекты). В результате при оптимальном расположении оптических осей слоя жидкого кристалла относительно вектора поляризации света достигается максимальное изменение двулучепреломления и соответственно фазовая модуляция света. Твист-эффект (Т-эффект), близкий по природе к S-эффекту, обеспечивает поворот плоскости поляризации света. Время электрооптического переключения в тонких слоях жидких кристаллов может

составлять  $\sim 10^{-5}$  с.

### Устройство считывания информации

Устройство считывания предназначено для преобразования оптического сигнала восстановленного голограммой в электрический сигнал. Очевидно, что количество и расположение элементов устройства считывания должно точно соответствовать элементам устройства ввода информации. Обычно, в качестве матрицы считывания используют матрицу фотодиодов, быстрдействие которых составляет около  $t \sim 10^{-6}$  с.

### Объективы (линзы) для преобразования Фурье

Объективы для преобразования Фурье должны быть высокого оптического качества с низким уровнем aberrаций. Поскольку используется два таких объектива, один – между устройством ввода и регистрирующим материалом, а другой – между регистрирующим материалом и устройством считывания информации, то качество и aberrации обоих объективов должны быть по возможности близкими. В значительной мере, проблема оптического качества объектива решается использованием для восстановления голограмм комплексно-сопряженной волны, идущей в обратном направлении по отношению к записывающей опорной волне. На рис.18 изображен пример оптической схемы, реализующей восстановление голограммы комплексно-сопряженным опорным пучком. При записи голограммы поворотное зеркало 7 (показано пунктиром) направляет излучение объектной волны, несущей информацию, отображенную устройством ввода 6, на регистрирующий материал 1 с помощью объектива 5. Опорная волна R с поляризацией, ортогональной поляризации объектной волны освещает регистрирующую среду, но не участвует в записи голограммы. После отражения зеркалом 2-3-4 с обращением волнового фронта поляризация обращенной опорной волны R\* совпадает с поляризацией объектной волны и происходит запись голограммы. На стадии считывания зеркало 2-3-4 перекрывается и опорная волна проходит через регистрирующий материал и восстанавливает объектную волну, которая распространяется по тому же оптическому пути, что и при записи. При этом поворотное зеркало 7 поворачивается на  $90^\circ$  (показано сплошной линией) и направляет объектную волну на устройство считывания данных 8. Таким образом, aberrации объектива 5 практически полностью компенсируются при прохождении объектной волны в обратном направлении.

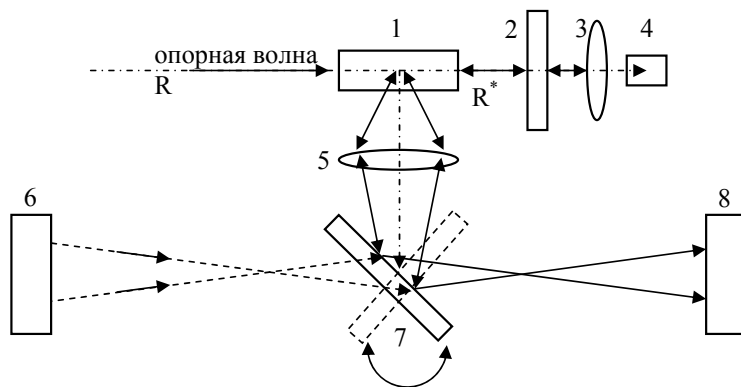


Рис.18. Оптическая схема, реализующая восстановление голограммы комплексно-сопряженным опорным пучком.

1 – регистрирующая среда, 2 – полуволновая пластинка, 3 – линза, 4 – среда для обращения волнового фронта, 5 – объектив, 6 – устройство ввода информации, 7 – поворотное зеркало, 8 – устройство считывания.

#### Ограничения плотности голографической записи

В результате того, что на голограмме одновременно можно зарегистрировать значительное количество ( $N$ ) бит информации при рассмотрении предельных значений плотности записи данных, необходимо учитывать «способность» голограммы восстанавливать различные «части» объекта, количество которых в нашем случае будет равно числу одновременно записываемых битов. Поэтому минимальный размер голограммы будет определяться исходя из минимально возможного интервала в пределах которого сохраняются свойства восстановленного изображения. В таком случае, размер голограммы  $D$  для записи  $N$  бит информации должен составлять не менее:  $D = \lambda \times (N/2\Omega)^{1/2}$ , где  $2\Omega$  - угол схождения объектной волны при записи.

Таким образом, при  $2\Omega = 1$  стерадиан (около  $60^\circ$ ),  $\lambda = 0.633$  мкм (He-Ne лазер) и  $N = 100$ , минимальный размер голограммы составляет  $D = 6.3$  мкм, а на площади в  $1 \text{ см}^2$  можно записать до  $2.5 \times 10^8$  бит информации, что сравнимо с побитовой оптической плотностью записи. Однако, в случае использования трехмерных сред для записи голограмм, плотность записи может значительно превышать это значение, поскольку на один и тот же участок диска записывают одновременно много голограмм, отличающихся либо длиной волны записи, либо направлением опорной волны. В действительности же, количество голограмм записанных на одном и том же участке регистрирующего материала будет также ограничено его динамическим

диапазоном, угловой селективностью и шумами, вызванными взаимодействием наложенных голограмм.

**Ограничения по динамическому диапазону** регистрирующего материала связаны с тем, что при записи конечного числа голограмм на одном и том же участке используется весь диапазон изменения показателя преломления данной среды и становится невозможной последующая запись.

**Ограничения по угловой селективности** связаны с тем, что полное число голограмм  $N$ , которое можно записать в диапазоне углов опорного пучка  $\Phi$  можно рассчитать по формуле:

$$N = \Phi / \Delta\theta \sim (\Phi \times n \times d) / \Lambda,$$

где  $\Delta\theta$  – угловая селективность,  $d$  – толщина голограммы,  $n$  – средний показатель преломления среды,  $\Lambda$  – период решетки.

Таким образом, например, для  $\Lambda = 0.376$  мкм (при записи на длине волны  $\lambda = 0.532$  мкм взаимно ортогональными пучками),  $\Phi = 10^\circ$ ,  $d = 1$  мм,  $n = 2$  получим, что  $N \sim 930$ .

**Ограничения по шумам** связаны с взаимным влиянием наложенных голограмм, так как в пучок света, дифрагированный на одной из голограмм, вносится вклад (рассеяние) и от остальных голограмм, записанных на этом же участке материала. Если предполагается получить при считывании заданную величину ОСШ (отношение сигнал/шум), то общее число наложенных голограмм будет ограничено величиной:

$$N = d / (4\lambda \times (\text{ОСШ})^2),$$

где  $d$  – толщина голограммы.

Таким образом, если  $d = 2$  мм,  $\lambda = 0.532$  мкм, ОСШ = 3, то предельное число страниц записанной информации будет составлять  $N \sim 104$ .

### Быстродействие голографических устройств записи и хранения информации

Для формирования матрицы сигналов, предназначенной для голографической записи по методу голографии Фурье, используют пространственные модуляторы света. В настоящее время такие модуляторы построены на основе ЖК матриц либо системы микрзеркал. Разрешение таких модуляторов достигает  $1280 \times 1024$  пикселей, что соответствует  $\sim 1.3 \times 10^6$  бит информации. Частота смены изображения достигает 1000 раз в секунду. Таким образом, при записи голографическим методом возможно уже в настоящее время достигнуть скорости записи порядка 1 Гбит/с при усло-

вии наличия соответствующих регистрирующих материалов и лазеров с достаточной мощностью излучения.

При считывании информации излучение лазера фокусируют в область голограммы и восстановленная объектная волна попадает на устройство детектирования, в качестве которого можно использовать ПЗС (англ. CCD) или КМОП (англ. CMOS) матрицы. Считывание можно осуществлять как импульсным, так и непрерывным лазерным излучением, однако в последнем случае для обеспечения достаточной скорости считывания ( $\sim 1000 \text{ с}^{-1}$ ) длительность его воздействия должна быть не более 1 миллисекунды, что приводит к необходимости использовать достаточно мощные лазеры ( $\sim 1 \text{ Вт}$ ). Как и в случае записи, скорость считывания для матрицы размером  $\sim 10^6$  бит составит около 1 Гбит/с.

Таким образом, голографический метод записи и хранения информации открывает возможность создания оптических устройств, которые по основным характеристикам (плотность записи, скорость записи/считывания, скорость выборки информации, помехозащищенность и др.) существенно превосходят оптические и магнитные системы с побитовой записью информации.

### **Экспериментальные разработки систем голографической памяти**

Одним из показателей развития той или иной технологии является разработка приборов и устройств, а также их доступность на рынке.

Хотя впервые предложение по созданию голографической памяти с использованием объемной записи голограмм было опубликовано Ван Хирденом в 1963 году, попытки создания объемной голографической памяти практических успехов в 1970-е годы не имели. Фактически 70-е и 80-е годы составляли период, в котором преобладали исследования по голографической памяти с записью тонких голограмм.

Голографические запоминающие устройства, предназначенные для использования в вычислительных машинах со страничным вводом и произвольной выборкой информации, были предложены Смитом и Галлагером в 1967 году и Микаэляном с сотрудниками в 1968 году. В предложенных ими устройствах использовался страничный ввод цифровых данных, запись набора голограмм страниц и считывания произвольной голограммы адресуемым лучом. При таком построении обеспечивались наибольшая информационная емкость и быстрое время доступа.

Одно из первых голографических запоминающих устройств с угловым мультиплексированием было создано еще в 70-х годах специалистами фирмы Thompson. Экспериментальный макет голографического запоминающего устройства использовал постраничную запись

информации, акустооптический дефлектор, а в качестве регистрирующего материала для записи объемных голограмм - кристалл ниобата лития  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ .

К середине 70-х годов 20 века интерес к голографическим системам памяти практически угас, так как не существовало малогабаритных устройств ввода постраничной информации достаточно большого объема, а также доступных устройств считывания этой информации при восстановлении голограмм. В начале 90-х годов ситуация кардинально изменилась с развитием микроэлектроники, особенно в области создания малогабаритных ЖК матриц и матриц фотодетекторов на основе ПЗС (приборы с зарядовой связью) или КМОП (комплементарные металл-оксидные полупроводники) технологий.

Первые голографические диски формата HVD (Holographic Versatile Disk) были разработаны компанией Maxell и позволяют записывать до 3.9 ТБ информации на светочувствительном полимерном слое. Для считывания информации с голографического HVD диска используются два лазера на разных длинах волн, зеленый – для считывания данных, записанных на голограмме, и красный – для контроля и управления сервоприводом диска. Скорость считывания информации достигает 125 МБ/с. Предполагается начать выпуск HVD дисков с емкостью до 300 ГБ и скоростью считывания 20 МБ/с.

Существуют и альтернативные голографические системы записи и хранения информации, например, разработанные компанией InPhase (США). Голографические диски Tapestry компании InPhase несколько больше по размеру, чем диски DVD (диаметр 130 мм, толщина 3.5 мм). Емкость голографического диска компании InPhase составляет 300 ГБ, хотя в дальнейшем предполагается увеличение ёмкости до 1.6 ТБ. Скорость считывания достигает в настоящее время 20 МБ/с. Внешний вид разработанного InPhase голографического устройства записи/считывания и голографического диска представлены на рис.19. Данные кодируются в двоичном коде и отображаются на жидкокристаллическом (ЖК) модуляторе света, который просвечивается лазерным лучом ( $\lambda=405$  нм). Прошедший через ЖК модулятор лазерный луч далее фокусируется на голографический регистрирующий материал. Одновременно, в эту же точку фокусируется излучение опорной волны того же лазера. Таким образом, происходит запись голограммы. Для повторной записи на это же место, опорный пучок изменяет свой угол падения за счет наклона зеркала. Производители рассчитывают на высокую стабильность хранения данных (более 50 лет) при многократном считывании.



Рис.19 Голографическое устройство записи и считывания компании In-Phase Technologies и голографический диск Tapestry.

Усилия многих исследователей в ведущих университетах и компаниях мира привели к пониманию общих принципов построения голографических систем памяти и были сформулированы основные требования к компонентам таких систем с учетом всех ограничений, которые присущи данному методу. В настоящее время на лабораторных макетах систем голографической памяти с использованием в качестве регистрирующей среды полимерного материала достигнута плотность записи до  $4 \times 10^{10}$  бит/см<sup>2</sup>, что примерно в 10 раз превышает значения величин, полученных для побитовой записи на дисках DVD ( $\sim 4 \times 10^9$  бит/см<sup>2</sup>). Скорость считывания данных постраничной записи достигала при этом 10 Гбит/с. Однако в настоящее время системы голографической памяти не дошли до потребителя по причине своей относительно высокой стоимости и габаритов. Не решены ещё многие проблемы и с системами голографических реверсивных материалов для систем перезаписываемой памяти. Одна из наиболее острых проблем – крайне низкая чувствительность имеющихся в арсенале исследователей фоторефрактивных материалов. В ближайшей перспективе станет понятно, смогут ли голографические системы памяти конкурировать с традиционными оптическими, магнитными и полупроводниковыми (флеш-память) системами.



## Материалы для объёмной голографии

Важнейшими характеристиками объёмных голографических материалов являются:

1. толщина (определяющая селективность и информационная ёмкость)
2. разрешающая способность
3. стабильность модуляции
4. стабильность формы (отсутствие усадки)
5. дифракционная эффективность
6. энергетическая светочувствительность
7. динамический диапазон
8. спектральная область чувствительности

Современные общие технические требования к объёмным (толстым) материалам для постоянной записи (архивной голографической памяти и высокоселективных дифракционных оптических элементов) таковы:

- толщина (0.5 ÷ 5) мм, обеспечивающая возможность создания структурно-организованных дифракционных элементов и объёмных рефрактивных структур со спектральной селективностью (0.2 ÷ 20) нм и пространственной (0.5 ÷ 5) мрад
- стабильность модуляции показателя преломления: сохранение заданной эффективности голографических решеток в течение десятков лет при температурах от 0°C до 50-70°C
- малое изменение размеров (усадки или разбухание) в ходе постэкспозиционной обработки и эксплуатации – не более 0.1% – 0.5%; большие изменения приводят к сбоям в считывании информации или нарушению спектральной и угловой настройки оптических элементов.
- спектральная область светочувствительности, отвечающая спектру излучения распространенных лазерных источников; типично – синезеленая (480-550 нм, соответствует аргоновым и неодимовым лазерам); чувствительность к красному свету желательна, но не обязательна
- возможность записи "скрытого изображения", не искажающего волнового фронта, которое далее быстро проявляется (усиливается) без сложной, во всяком случае без влажной, постэкспозиционной обработки.
- высокая разрешающая способность, позволяющая записывать голографические решетки с пространственными периодами 0.2 – 2 мкм
- значительный диапазон изменения показателя преломления, достаточный для записи в системах хранения информации большого числа наложенных голограмм (возможно, невысокой дифракционной эффективности) в одном объёме или для селективных голограммных

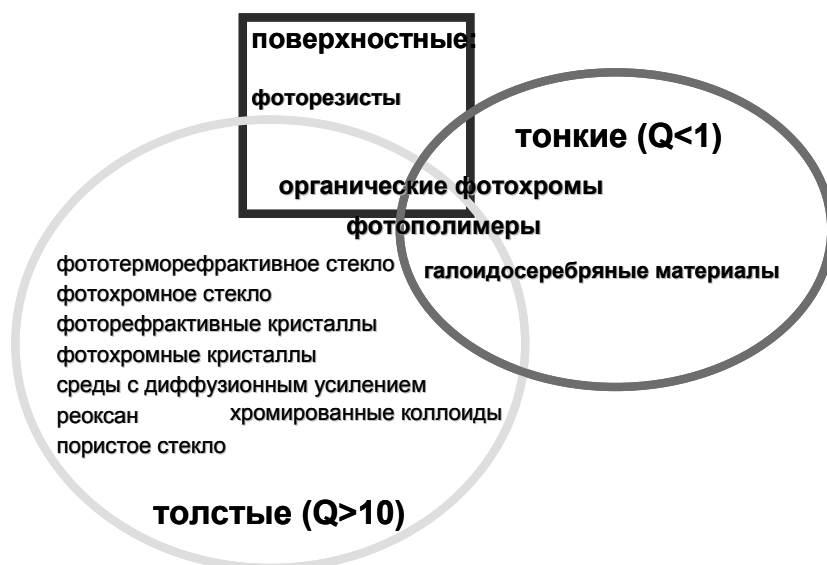
элементов – одной или нескольких голограмм высокой (близкой к 100%) дифракционной эффективности

- малая величина светорассеяния, которая, вместе с дифракционной эффективностью, определяет один из важнейших параметров - отношение сигнал-шум.

Реально для целей голографической памяти требуются материалы толщиной в сотни микрометров – миллиметры; недостаток таких материалов долго сдерживал разработки. К действительно толстым можно отнести такие материалы, как

- фоторефрактивные кристаллы
- фотохромные кристаллы, стёкла, полимеры
- фототерморефрактивное стекло
- фотополимеризующиеся материалы
- реоксан
- полимерные среды с диффузионным усилением (с фенантренхином)
- различные материалы на основе пористого стекла

Чисто поверхностные (рельефные) материалы – фоторезисты: позитивные, демонстрирующие рост растворимости при засветке (новолак, диазохинон – широко применялись в фотолитографии) и негативные, растворимость которых уменьшается под действием света.



**Галодосеребряные фотоматериалы** (в том числе высокоразрешающие липпмановские, позволяющие записывать голограммы Денисюка)

и материалы на основе **бихромированных коллоидов**, как правило, тонки (до десятков микрометров); исключение составляют толстые – до миллиметра – самопроявляющиеся слои БХЖ. Кроме того, материалы на основе желатины требуют тщательной защиты от влаги, которая способна привести к значительному набуханию слоев.

Многие классические работы по объемной голографии были выполнены с использованием **фоторефрактивных (электрооптических) кристаллов**, таких как ниобат лития. На основе таких кристаллов разработаны системы оперативной голографической памяти; они обладают такими важными преимуществами, как стабильность размеров и возможность перезаписи, но мало пригодны для массового производства крупных деталей. Помимо фоторефрактивных кристаллов, в объемной голографии используются **фотохромные** кристаллы с центрами окраски, фотохромные и фоторефрактивные полимеры, а также фототерморефрактивные стекла. Достоинство фотохромных материалов – обратимость; типичные недостатки – не очень высокая эффективность голограмм и их деградация под действием считывающего света. Как весьма своеобразный и очень перспективный органический фотохром стоит упомянуть светочувствительный белок бактериородопсин, для оптимизации свойств которого успешно применяется генная инженерия. Фототерморефрактивные **стёкла** позволяют создавать стабильные эффективные голограммы; их использование подразумевает точнейшую оптимизацию композиции и режима высокотемпературной обработки стекла; отклонения от оптимума вызывают увеличение размеров микрокристаллов и, как следствие, рост светорассеяния.

Некоторые органические фотохромы, такие как "фотоадресуемые полимеры" с азо-группами, характеризуются множественными откликами на световое воздействие, вызывающее, через изомеризацию азо-групп, движение на нескольких уровнях пространственного масштаба:

- молекулярное движение (изомеризация)
- доменное движение (упорядочение боковых цепей макромолекул)
- макроскопическое движение

Такое богатство откликов материала на свет позволяет использовать для записи информации оптически, в том числе голографическими, методами:

- изменение спектра поглощения (фотохромизм)
- фотоанизотропию (двулучепреломление)
- фоторельеф.

Природа фотоиндуцированного рельефа в этом случае несколько иная, чем в случае фоторезистов:

изменение молекулярного объёма при фотореакции → изменение свободного объёма → релаксация свободного объёма (рис. 20) → образование рельефа

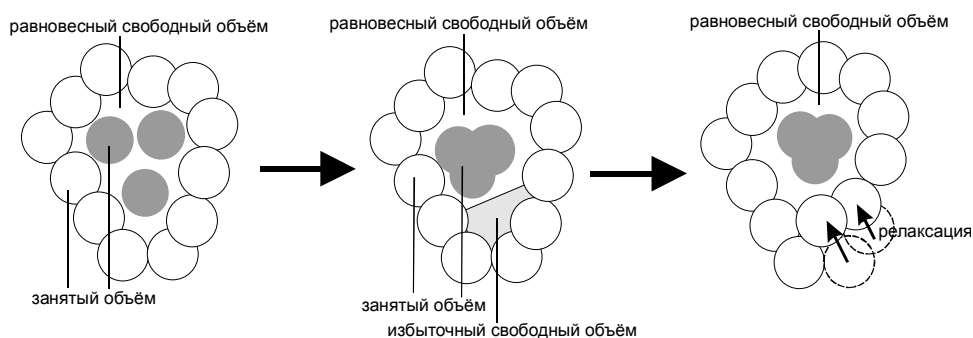


Рис.20. Релаксация свободного объёма полимера: при химической реакции, произошедшей внутри полости свободного объёма полимера, уменьшился занятый объём, увеличился свободный, часть которого оказалась избыточной по отношению к термодинамически равновесному. Далее происходит перемещение полимерного окружения, при котором свободный объём приближается к равновесному.

В органических материалах, в том числе полимерных, протекают разнообразные фотохромные (связанные с изменением спектра поглощения, то есть цвета) процессы, которые могут быть использованы для записи информации:

- фотоизомеризация
- фоторазложение
- фотоприсоединение
- фотодимеризация

И для изучения, и для практического использования во многих случаях наиболее удобной оказывается фотоизомеризация – внутримолекулярный процесс, связанный с взаимным перемещением групп атомов, энергию для которого предоставляет поглощённый фотон; в частности, *транс-цис* изомеризация может быть представлена как поворот одной части молекулы относительно другой вокруг соединяющей их химической связи.

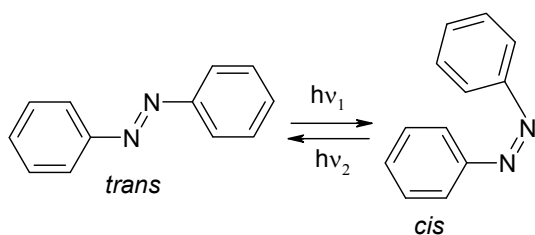


Рис.21. Типичный фотохромный процесс – обратимая *транс-цис* фотоизомеризация азобензола

Среди синтетических фотохромных веществ наиболее перспективными признаются фульгиды и диарилэтены, фотохромный процесс которых состоит в раскрытии цикла и изомеризации (рис. 22) и порождает значительные спектральные и рефрактивные изменения (рис. 23), позволяющие записывать и многократно перезаписывать эффективные голограммы. Достоинства красителей этих классов таковы:

1. высокий цветовой контраст (сильные спектральные изменения, сопровождающие фотоизомеризацию)
2. высокий квантовый выход (энергетическая эффективность) изомеризации
3. высокая темновая стабильность изомеров (окрашенная форма не переходит самопроизвольно в бесцветную, и наоборот)
4. высокая цикличность (изомеризация может быть проведена многократно в обоих направлениях, что не очень типично для органических фотохромов)

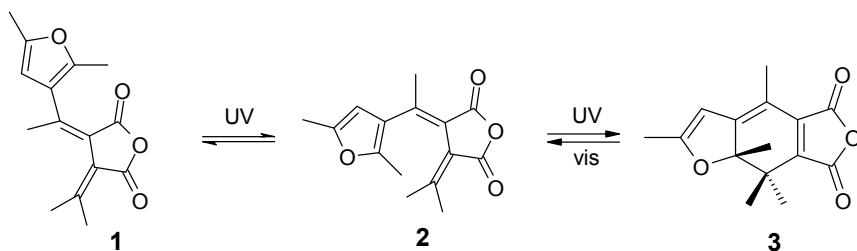


Рис.22. Схема фотохромных превращений фульгидного красителя, включающая переходы между бесцветными (не поглощающими в видимой области) открытыми формами **1** и **2** и между формой **2** и окрашенной замкнутой формой **3**.

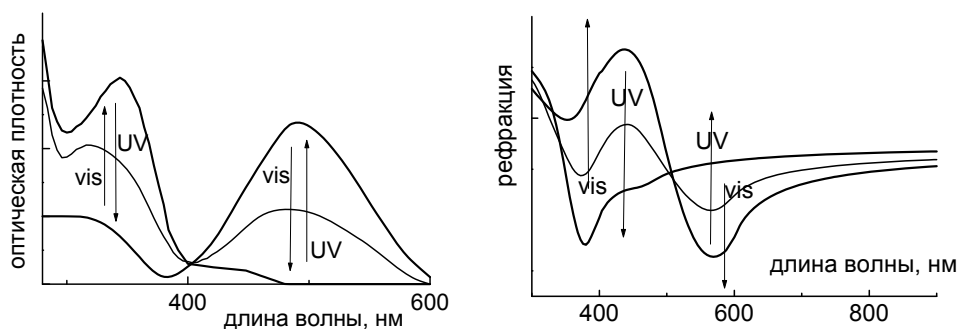


Рис.23. Изменения спектра поглощения и рефракции фульгинного красителя в ходе фотохромных превращений под действием видимого и УФ излучения

Для таких приложений, как создание голографических компакт-дисков или селективных оптических элементов с большой апертурой, подходят почти исключительно полимерные регистрирующие среды. Большинство разрабатываемых и используемых в настоящее время материалов для объемной голографии с постоянной записью относятся к классу фотополимеров (ФП), формирование голограмм в которых обусловлено фотоиндуцированными полимеризацией или сшиванием полимерных цепей. Фотополимеризация, то есть цепной рост полимерных цепей (макромолекул) из малых молекул (мономеров) под действием света, сопровождаемая диффузионным перераспределением мономера в пучности интерференционной картины, позволяет получить значительную модуляцию оптических параметров вещества ( $\Delta n_{\max} > 0.01$ ), но, как правило, сопровождается сильным (5-20%) изменением толщины материала (как правило, уменьшением – усадкой). Усадка или разбухание означают изменение брэгговской настройки дифракционных оптических устройств, тем более пагубное, чем больше физическая толщина голограммы, то есть чем полнее мы пытаемся использовать потенциал объемной голографии. Вызванное мокрой обработкой фотографических слоев изменение их толщины, достигающее 20%, было в свое время нежелательно, но терпимо (при толщине слоя  $\sim 0.01$  мм), в то время как от современных толстых (порядка миллиметра) материалов требуется стабильность никак не хуже 0.5%. Велики (2-4%) усадки известных фотополимеризующихся материалов Omnidex фирмы DuPont de Nemours.

**Основная проблема большинства полимерных материалов** – их недостаточная для голографии жесткость (стабильность параметров, главным образом геометрических):

- молекулярная диффузия приводит к разрушению (падению эффективности) голограмм, тем более быстрому, чем меньше пространственный период, или даже к невозможности эффективной записи высокочастотных голограмм
- деформации материала вызывают искажения восстанавливаемого волнового фронта; усадки или разбухание означают изменение брэгговской настройки дифракционных оптических устройств. Этот эффект усугубляется при увеличении толщины голограммы, что не позволяет в достаточной мере использовать потенциал объемной голографии. Вызванное мокрой обработкой фотографических слоев изменение их толщины, достигающее 20%, было в свое время нежелательно, но терпимо, в то время как от современных толстых (порядка миллиметра) материалов требуется стабильность не хуже 0.5%

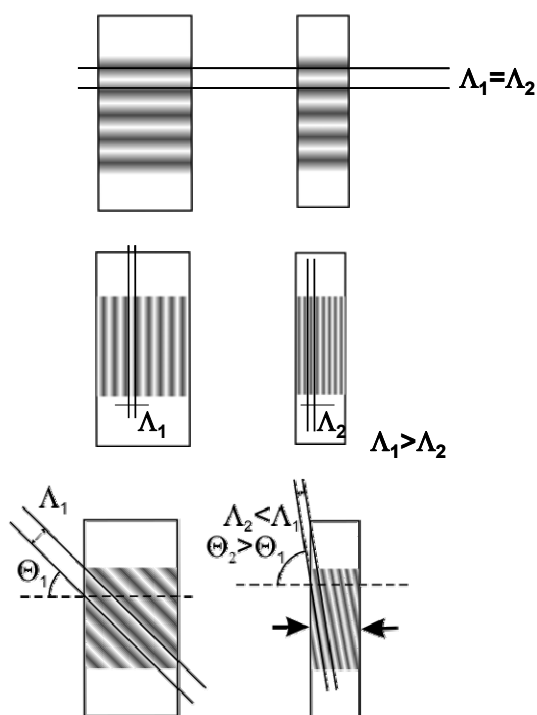


Рис.24. Иллюстрация влияния поперечной усадки объёмного материала на симметричные пропускающие и отражательные, а также наклонные голограммные решётки.

Как правило, усадка сильнее проявляется в направлении, перпендикулярном поверхности слоя; поэтому она сильнее сказывается на отражательных голограммах, чем на пропускающих, а наклонные голограммы испытывают поворот (рис. 24).

Проблема усадки объемных полимерных материалов после записи голограмм может решаться следующими путями:

- увеличение жёсткости путём уменьшения концентрации жидкого мономерного компонента системы (например, путем предварительной засветки) – это, однако, вызывает снижение чувствительности и динамического диапазона;
- использованием возможно более жесткого полимера, например, химически сшитого, или же увеличением жесткости материала посредством внедрения в него малых неорганических частиц или связного неорганического каркаса (пористого стекла, ПС);
- подбором фотохимического механизма записи для компенсации усадки среды; так, ученые Polaroid (потом Aprilis) смогли уменьшить усадку до менее чем 0.1%, тонко оптимизировав катионную полимеризацию с открытием цикла.
- компенсацией искажений путём адаптации к ним геометрии или длины волны считывания (например, с помощью перестраиваемого лазера)

Развитие голографических ФП шло от жидких композиций к "сухим", не требующим проявления, и далее к композитам ФП с неорганическими частицами, сетями, или с ЖК включениями, дающими возможность управления свойствами голограмм.

К фотополимерам в расширенном понимании относят также и материалы, в которых под действием света происходит не полимеризация, а поперечное сшивание или, наоборот, разрыв макромолекул. Как правило, фотополимерные материалы состоят из полимерной матрицы, в которой распределены сенсibilизатор, поглощающий свет, инициатор полимеризации, мономер, иногда другие компоненты.

В результате работы по ФП для голографии, которая велась в США с 1960-х гг. (Bell, Dupont, Polaroid), на рубеже веков были созданы толстые ФП нового поколения с очень хорошими характеристиками, в частности, минимальными усадками (<0.1%), выпускаемые в настоящее время дочерними фирмами Bell и Polaroid, соответственно InPhase ("Tapestry") и Aprilis (HMD). Массового внедрения технологий, основанных на объемной голографии, пока не наблюдается, а в современных экспериментальных разработках, требующих материалов большой толщины (миллиметры), по-прежнему используются ФП материалы традиционного типа, при их очевидных недостатках. Существующие образцы новых безусадочных ФП имеют толщину порядка 100 мкм, большую, но недостаточную для многих задач спектрального уплотнения или фильтрации. Так, например, для отражательной голограммы со спектральной селективностью в 0.1 нм в ви-



димой или ближней ИК области потребуется материал толщиной не менее 1 мм.

Можно выделить некоторые типы фотополимеров (фотополимеризующихся композиций):

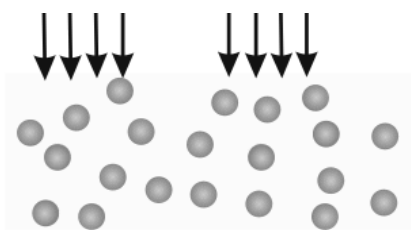
1. использующие дополимеризацию под действием света остаточного мономера, присутствующего в толще не полностью заполимеризованного материала, например, полиметилметакрилата; простейший и самый старый вариант, в котором модуляция оптических параметров (показателя преломления) создаётся за счёт модуляции плотности полимера.
2. двух- и многокомпонентные композиции: совместная полимеризация нескольких мономеров с различными оптическими свойствами и их фотоиндуцированное пространственное разделение позволяют усилить оптическую модуляцию, то есть получить более эффективную голограмму
3. композиции с нейтральным компонентом, такие как, например, фотоформеры Института физики АН Украины; нейтральные включения, существенно отличающиеся от окружающей среды по показателю преломления, не участвуют в химических трансформациях, но дают большой вклад в фазовую модуляцию и обеспечивают её стабильность за счет своего перемещения в материале из-за различного сродства к полимеру и мономеру.
4. Omnidex, выпускавшийся фирмой Dupont; в настоящее время на рынок не поставляется
5. HMD от Aprilis (Polaroid) – силоксановый полимер с очень низкой усадкой (0.1%), достигнутой благодаря применению полимеризации с раскрытием цикла (cationic ring-opening polymerization, CROP)
6. Tapestry от InPhase (Bell), реализующий "двойную фотохимию" (double photochemistry) и также характеризующийся очень низким уровнем усадки и большой толщиной.

В формировании голограмм практически во всех фотополимерах ключевую роль играет вызванное пространственно неоднородной экспозицией диффузионное перемещение компонентов материала, обеспечивающее рост фазовой модуляции и стабилизацию голограмм. Диффузионный механизм формирования голограмм в фотополимеризующихся композициях схематически показан ниже:

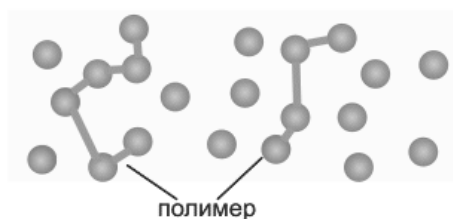
1. пространственно неоднородное возбуждение, формирование первичных фотопродуктов – активных радикалов
2. пространственно неоднородная цепная полимеризация
3. диффузия мономера, выравнивание концентрации
4. равномерное возбуждение, полная полимеризация

Формирование голограммы в фотополимере определяется конкуренцией полимеризации и диффузии; тот факт, что коэффициент диффузии во многих случаях зависит от степени полимеризации  $\alpha$ , следовательно, от пространственной координаты и времени, приводит к нелинейности

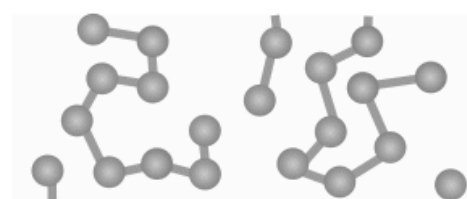
записи. В формировании голограмм в некоторых фотополимерах активную роль играют "нейтральные" частицы, не принимающие участия в химическом процессе полимеризации, но перемещающиеся в узлы регистрируемой интерференционной картины и тем усиливающие модуляцию показателя преломления из-за различной совместимости с мономером и полимером. Механизм формирования голограмм в фотополимерах без таких нейтральных компонент и с ними иллюстрируются рис.25 и 26:



Фотополимеризующаяся композиция содержит малые молекулы (мономер или олигомер), способные при надлежащих условиях соединиться в цепь, инициатор полимеризации, задача которого создать эти условия – как правило, при экспонировании породить радикалы, запускающие цепную реакцию. Часто свет поглощается отдельным красителем-сенсibilизатором, который передаёт инициатору энергию возбуждения.

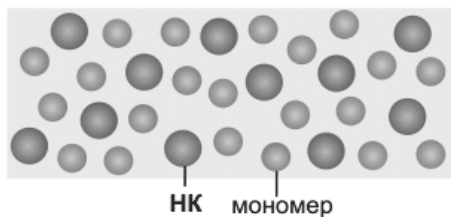


В результате экспонирования малые молекулы объединяются в макромолекулы – полимерные цепи; концентрация полимера соответствует распределению интенсивности света в регистрируемой интерференционной картине. Пространственно модулированное распределение молекул мономера выравнивается благодаря диффузии, что ещё более усиливает пространственную модуляцию плотности и, соответственно, оптических параметров материала.

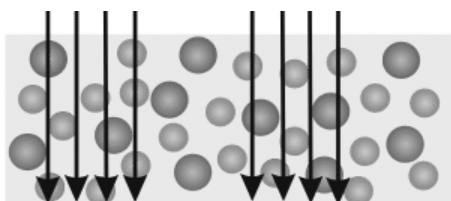


Полученное распределение плотности материала может быть зафиксировано благодаря полной полимеризации, вызванной равномерной засветкой всего материала.

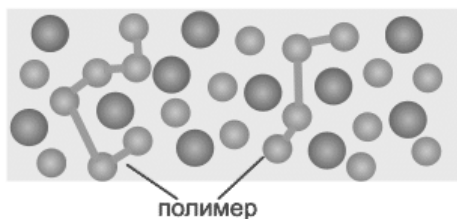
Рис.25. Схема формирования голограмм в фотополимерах без нейтральных компонент



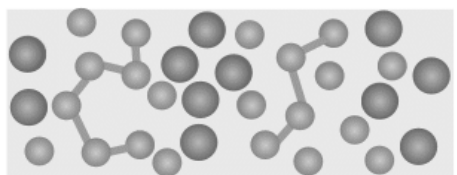
Исходно композиция состоит из некой полимерной матрицы, в которой равномерно распределены молекулы мономера, способные вступить в цепную реакцию полимеризации, и нейтральные частицы, к полимеризации неспособные (а также не показанные на схеме добавки, такие как, например, сенсibilизатор, инициатор полимеризации).



При экспонировании свет поглощается сенсibilизатором, который передаёт энергию возбуждения на инициатор, или самим инициатором, и запускается реакция полимеризации.



В пучностях записываемой интерференционной картины молекулы мономера объединяются в полимерные цепи, меняя при этом оптические свойства материала (показатель преломления); кроме того, высвобождается свободный объём, избыток которого перераспределяется в пространстве (локальное изменение плотности),



а также происходит диффузионное перераспределение мономера и НК во встречных направлениях: мономер диффундирует к пучностям, где его концентрация понижена при полимеризации, а НК, выталкиваемый полимерными цепями – к узлам. Происходит своего рода разделение фаз на микроскопическом уровне: в узлах собирается НК, а в пучностях – полимер и его мономер (который тоже может быть заполимеризован равномерной засветкой); благодаря различию молекулярной рефракции полимера и НК формируется сильная оптическая решётка.

Рис.26. Схема формирования голограмм в фотополимерах с нейтральной компонентой (НК)

Использование неорганического каркаса позволяет создать жесткий материал большой толщины на основе таких сред, как ФП, бихромат желатины, электрооптические среды или галогениды серебра в нанокристаллической форме. Материалы на основе ПС могут использоваться в оптоинформатике для изготовления объемных оптических элементов с повышенными требованиями к геометрической стабильности, служить матрицами для фотонно-кристаллических структур. Каркас может создаваться как по золь-гельной технологии, так и путем химического травления стекла. ПС не только придает необходимую жесткость светочувствительному материалу, для которого оно служит каркасом, но и обеспечивает доступ необходимых реагентов или иммерсии в толщу материала, а также регулирует размеры и форму находящихся в порах частиц.

По возможности многократной записи материалы для объемной голографии можно разделить на две основные группы:

- 1) не допускающие перезаписи, предназначенные для архивной памяти и голограммных оптических элементов:
  - фотополимеризующиеся
  - фотохромные со стабильными изомерами
  - материалы с диффузионным усилением
- 2) допускающие многократную запись:
  - фоторефрактивные кристаллы и полимеры
  - фотохромы органические и неорганические (кристаллы с центрами окраски), в частности, gated - двуцветные

Голограммы, записанные в обычных фотохромных материалах, подвержены стиранию при считывании информации. Варианты решения проблемы деструктивного считывания таковы:

1. считывание на длине волны, отличной от длины волны записи
2. формирование голограмм с пространственным перемещением элементов их конструкции и термическим фиксированием (фоторефрактивные кристаллы, материалы с ФХ, фотополимеры)
3. использование для записи двухфотонных процессов
4. десенсибилизация (например, удаление кислорода из реоксана)
5. периодическая перезапись информации

### **Дисперсионная фоторефракция. Реоксан**

Согласно соотношениям Крамерса – Кронига, , вызванное фотохимической трансформацией изменение спектра поглощения в относительно узкой спектральной области может отзываться изменением показателя преломления в гораздо более широкой области спектра, что иллюстрируется приведёнными результатами модельного расчёта (рис. 27):

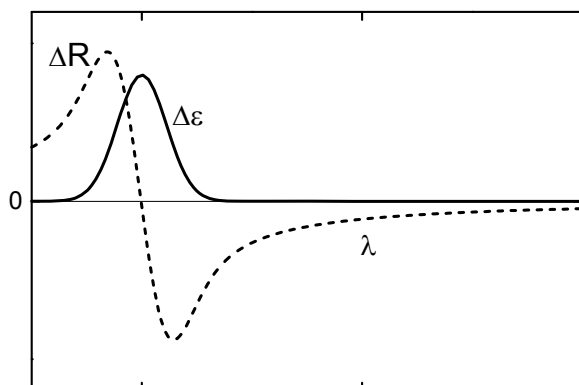


Рис.27. Иллюстрация соотношений Крамерса-Кронига: спектр гауссовой формы и соответствующая ему спектральная зависимость показателя преломления

Сказанное позволяет получить чисто фазовую голограмму на длине волны записи, используя для фототрансформации сенсibilизированные процессы. Эта идея, сформулированный в конце 1970-х гг. работавшими в ГОИ Г.И.Лашковым и В.И.Сухановым в форме принципа дисперсионной фоторефракции, был воплощён ими в материале (точнее, семействе материалов) Реоксан с использованием сенсibilизованного триплет-триплетным переносом энергии фотоокисления производных антрацена, распределённых в полимерном стекле:

1. Поглощение красителем **S** фотона переводит его из основного (синглетного) состояния в синглетное возбужденное и затем в триплетное возбужденное состояния:  ${}^1\text{S} + h\nu \rightarrow {}^1\text{S}^* \rightarrow {}^3\text{S}^*$ ;
2. Триплетное состояние красителя тушится вследствие безызлучательного переноса энергии на кислород, находящийся в основном состоянии  ${}^3\text{S}^* + {}^3\text{O}_2 \rightarrow {}^1\text{S} + {}^1\text{O}_2^*$ . При этом происходит генерация возбужденного синглетного кислорода, а молекула красителя дезактивируется и вновь готова принять участие в следующем акте сенсibilизации.
3. Синглетный кислород окисляет антрацен **A** до фотооксида (транс-аннулярной перекиси):  $\text{A} + {}^1\text{O}_2^* \rightarrow \text{AO}_2$

При фотоокислении антрацена происходит значительное изменение его поглощения в УФ области, сопровождаемое сильным изменением показателя преломления полимера (до 0.01) в видимой и ближней ИК области, что даёт возможность записи в реальном времени высокоэффективных голограмм.

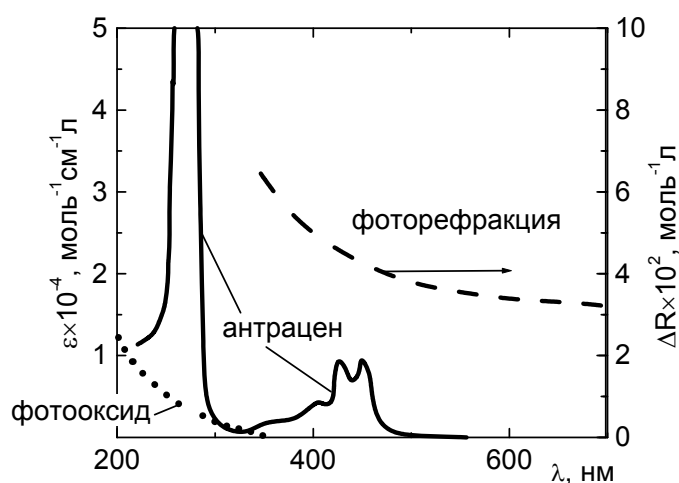


Рис.28. Спектры поглощения антрацена и его фотооксида; спектральная зависимость фоторефракции

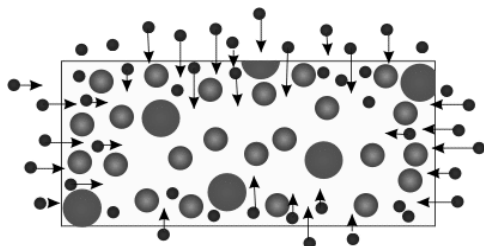
С применением в качестве сенсibilизаторов различных красителей была получена спектральная сенсibilизация реоксана:

- а) к сине-зеленой области спектра (излучение  $Ag^+$  лазера – 488 и 514нм);
- б) панхроматическая (до 700 нм);
- в) к излучению криптонового лазера (752 нм);
- г) к излучению ближней ИК области (700 - 800 нм)

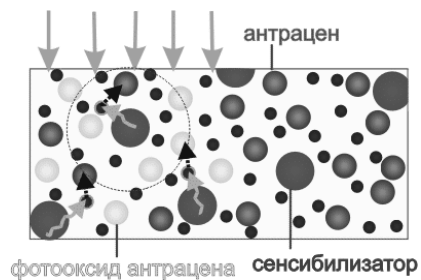
Был разработан вариант реоксана, в котором голограммы формируются не непосредственно в ходе экспонирования, а после него, при равномерном облучении; для этого в качестве сенсibilизатора использован изомеризующийся краситель из группы тиюиндигоидных, точнее, его *транс*-изомер (*цис*-изомер не является сенсibilизатором окисления):

На рис.29 и 30 показаны стадии формирования голограмм в реоксане со стабильным и фотоизомеризующимся красителем-сенсбилизатором :

1. насыщение материала кислородом



2. сенсбилизированное фотоокисление антрацена при экспонировании



3. выход кислорода

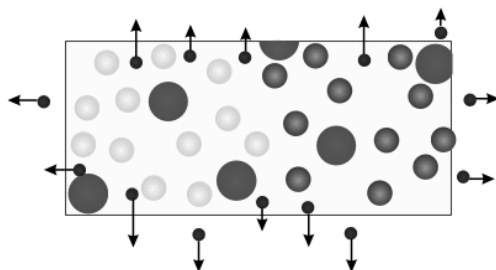
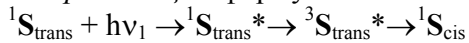
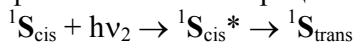


Рис.29. Формирование голограммы в "классическом" реоксане

1. равномерная засветка материала в отсутствие кислорода, при которой осуществляется перевод красителя из *транс*- в *цис*-форму:

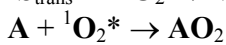
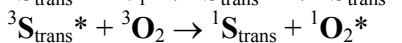
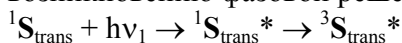


2. запись скрытого изображения голограммы в виде амплитудной решетки (*цис-транс* фотоизомеризация) с образованием в пучностях интерференционной картины *транс*-изомера красителя, являющегося сенсбилизатором фотоокисления антрацена:



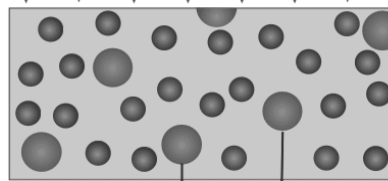
3. насыщение образца кислородом

4. фотопроявление при равномерной засветке: окисление антрацена, сенсбилизированное *транс*-изомером красителя, приводящее к возникновению фазовой решетки:



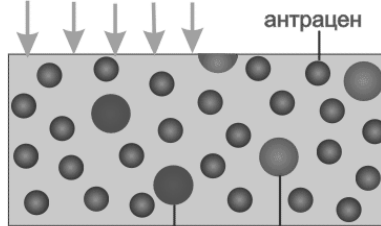
5. фиксирование: выход кислорода

свет, поглощаемый транс-тиоиндиго

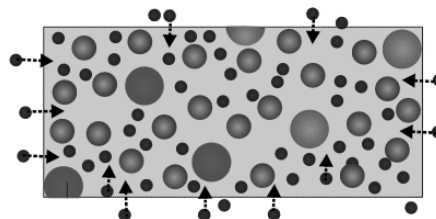


цис-тиоиндиго (не сенсбилизатор)

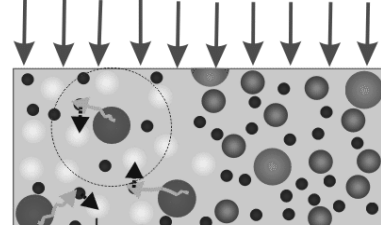
свет, поглощаемый цис-тиоиндиго



транс-тиоиндиго (сенсбилизатор)    цис-тиоиндиго (не сенсбилизатор)



свет, поглощаемый транс-тиоиндиго



фотооксид антрацена    антрацен

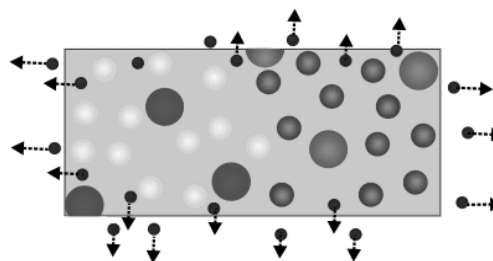


Рис.30. Формирование голограмм в реоксане со световым проявлением.



После записи голограммы в реоксане сохраняются в течение длительного времени, но всё же деградируют из-за химических превращений антрацена и его фотооксида в антрахинон и другие продукты (рис. 31), а также релаксации периодической структуры вследствие диффузии молекул антрацена и его оксидов:

$$\begin{cases} \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - k \cdot C(x,t) \\ C(x,0) = C_0 + C_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right) \end{cases} \Rightarrow C(x,t) = C_0 + C_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right) \cdot \exp\left(-\frac{4\pi^2 D t}{\Lambda^2} - k t\right)$$

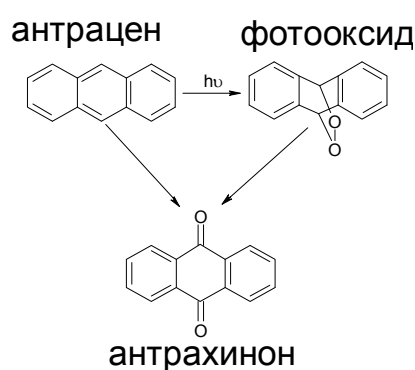


Рис.31. Схема превращений, происходящих в реоксане при записи (фотореакция антрацен-фотооксид) и после неё (темновые трансформации и фотооксида, и антрацена в другие соединения, из которых на схеме условно показан только антрахинон)

Однако молекулярная диффузия может иметь следствием не только деградацию, но и рост (усиление) голограмм.

### Диффузионное проявление (усиление) голограмм

В основе диффузионного усиления находится так называемый эффект дополнительных решёток, состоящий в том, что при записи голограммы в материале создаются не одно, а по меньшей мере два распределения концентрации (в простейшем случае – распределения вещества в исходном и фототрансформированном состояниях), релаксация модуляции которых, в частности вызванная диффузией, и определяет изменение фазовой модуляции голограммы после записи. Исходно взаимно дополнительные распределения концентрации оптически взаимно компенсируются, но их релаксация с разными скоростями может приводить к возможности не только падения, но и роста фазовой модуляции; в предельном случае очень медленной релаксации одного из распределений (например, вследствие утраты молекулами подвижности вследствие значительного увеличения раз-

мера) достигается усиление с последующим метастабильным состоянием (рис. 32).

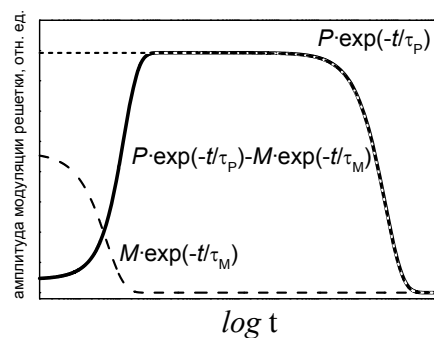


Рис.32. Изменение во времени амплитуд модуляции противофазных периодических распределений (решеток), образованных молекулами исходного рабочего вещества **М** и его фотопродукта **Р** с временами жизни  $\tau_M$  и  $\tau_P$  соответственно, а также амплитуды результирующей решетки (сплошная линия)

Несложный анализ показывает возможность трёх основных форм зависимостей фазовой модуляции от времени; рис. 33 иллюстрирует это экспериментальными примерами:

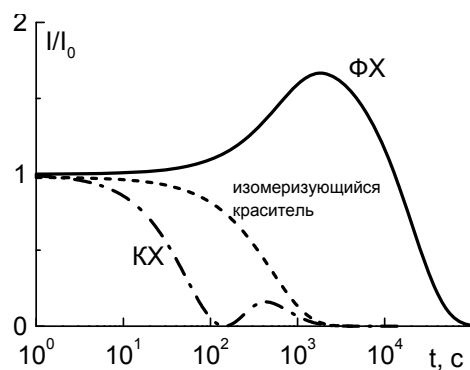
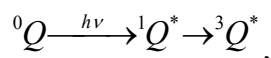


Рис.33. Возможные формы кривых постэкспозиционной релаксации фотоиндуцированных решёток (проявление эффекта дополнительных решёток на примерах ФХ, камфорхинона и изомеризирующегося красителя в низкомолекулярном стекле):

- монотонное падение (решётка на основе фотоизомеризирующегося тиюиндигоидного красителя)
- рост – падение (фотоприсоединение ФХ)
- падение-рост-падение (смена знака фотоиндуцированного изменения показателя преломления)

Фотоиндуцированный диффузионный перенос вещества является основным механизмом формирования голограмм во многих материалах, в частности фотополимерных, но в чистом виде, без цепной полимеризации, диффузионное проявление (усиление) голограмм реализуется в материалах с фенантренином благодаря его фотохимическому присоединению к полимерному окружению, описываемому следующей схемой и иллюстрируемой рис. 34:

Молекула ФХ поглощает свет и переходит в триплетное возбужденное состояние



далее отщепляет водород от молекул окружения – вероятнее всего от макромолекулы, с образованием пары радикалов и присоединение семихинонового радикала к макромолекуле, на много порядков менее подвижной, чем малые молекулы ФХ:

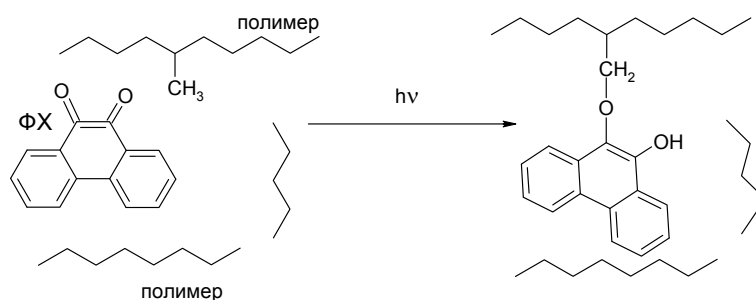


Рис.34. Фотоприсоединение ФХ к макромолекуле

При экспонировании материала интерференционным полем в нем создаются две противофазных структуры, состоящие из ПММА с ковалентно присоединенным ФХ (с максимумами концентрации в пучностях интерференционной картины) и ПММА со свободными молекулами ФХ (с максимумами в узлах интерференционной картины). Одна из структур стабильна, а вторая исчезает из-за естественной диффузии ФХ, выравнивающей его концентрацию. Таким образом, без дополнительной обработки происходит проявление объемной фотоиндуцированной структуры (голограммы). В отличие от ФП, формирование голограмм в которых также происходит во многом благодаря фотоиндуцированному пространственному перераспределению материи, цепной полимеризации при записи не происходит, а жидкий (мономерный) компонент в среде изначально отсутствует, поэтому фотоиндуцированная усадка сведена к минимуму (к на-

стоящему времени не измерена; во многих публикациях материалы с ФХ считаются безусловными). Такой механизм создания объемных структур обеспечивает их очень высокую стабильность, ограниченную даже не диффузией цепных молекул, которая чрезвычайно медленна в полимерном стекле, а старением полимерного материала в целом. Длительность диффузионных процессов квадратично зависит от пространственных периодов и обратно пропорциональна коэффициентам диффузии  $D$  (ФХ на стадии роста и макромолекул на стадии распада – различие на 6-8 порядков):  $\tau = \Lambda^2 / (4\pi^2 D)$

Последовательность стадий формирования голограмм такова (рис.35):

0-1. экспозиция – запись относительно слабой амплитудно-фазовой голограммы ("скрытого изображения") за счёт фототрансформации ФХ; пространственная модуляция интенсивности света в записываемой интерференционной картине трансформируется последовательно в модуляцию электронного возбуждения и далее в модуляцию концентрации ФХ и фотопродукта его взаимодействия с полимером (концентрационная решётка);

1-3. трансформация скрытого изображения в эффективную голограмму (проявление, усиление) за счёт диффузионного пространственного перераспределения ФХ: теперь голограмма связана с пространственной модуляцией плотности;

3-3а. фиксирование - фотоприсоединение оставшихся свободными молекул ФХ при некогерентной равномерной актиничной засветке, при котором меняется химический состав и, следовательно, средний показатель преломления, но не меняется пространственная модуляция каких-либо параметров.

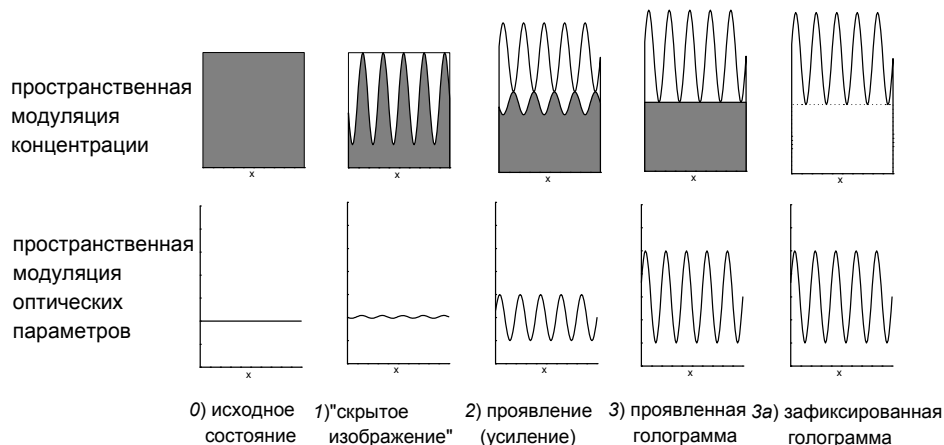


Рис.35. Пояснение к механизму формирования голограммы в материале с фенантренхиномом

Основные достоинства материалов, работающих по принципу диффузионного усиления с фотоприсоединением:

- запись во время экспонирования лишь слабой голограммы, не искажающей регистрируемое пространственное распределение света;
- возможность проявления голограмм до высоких эффективностей за счет естественных процессов без специальной обработки (кроме умеренного прогрева для ускорения);
- возможность фотохимического фиксирования (устранения светочувствительности) и отбеливания (устранения поглощения света в видимом диапазоне);
- высокая стабильность материала и записанных в нём голограмм;
- возможность изготавливать образцы материалов большого размера и толщины;
- отсутствие причин для значительных усадок.

Уже в модельной реализации материала была показана возможность изготовления среды толщиной в несколько миллиметров, обеспечивающей запись стабильных пропускающих и отражательных голограмм с эффективностью, близкой к 100% и спектральной селективностью лучше 0.1 нм.

Материалы на основе ФХ, в которых голограммы формируются без участия цепного процесса роста цепи, уступают лучшим ФП в светочувствительности и динамическом диапазоне, что ограничивает их применение в сверхплотном хранении информации, но они практически не имеют конкурентов среди полимерных материалов в приложениях, требующих большой толщины голограмм. В некоторых работах приводятся заниженные характеристики (чувствительность, динамический диапазон) материалов с диффузионным усилением, полученные ... без проведения усиления, то есть за характеристики голограммы выдаются характеристики её "скрытого изображения". Длительность проявления фотоиндуцированных структур (голографических решеток) определяется временем, за которое молекулы ФХ продиффундируют в среде в среднем на расстояние  $\sqrt{\langle x^2 \rangle} = \sqrt{2Dt}$ , сравнимое с характерным пространственным периодом решетки. Диффузия относительно крупных молекул в жестком полимерном стекле чрезвычайно медленна (коэффициент диффузии при комнатной температуре порядка  $10^{-23} \text{ м}^2/\text{с} = 10^{-5} \text{ нм}^2/\text{с}$ ). Даже для наименьших пространственных периодов, соответствующих отражательной геометрии записи (около 0.17), типичное время проявления составляет при 50°C несколько часов.

Совокупность процессов, определяющих изменение фазовой модуляции и, следовательно, дифракционной эффективности голограммы в материале с ФХ, конечно, сложнее, чем только медленная диффузия фотопродукта и быстрая диффузия непрореагировавшего ФХ, и зависимость фазовой модуляции описывается несколько более сложным выражением, чем приведённая при рассмотрении принципа диффузионного проявления комбинация двух экспонент. Выражение, приемлемо описывающее пост-

экспозиционную эволюцию голограммы с учётом существования промежуточных продуктов фотохимической трансформации ФХ, выглядит примерно так:

$$\Delta\varphi = A_R \exp\left(-\frac{t}{\tau_R^D} - \frac{t}{\tau_R}\right) - A_Q \exp\left(-\frac{t}{\tau_Q^D}\right) + \frac{1}{\tau_R/\tau_R^D + 1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_R^D} - \frac{t}{\tau_R}\right)\right] A_P \exp\left(-\frac{t}{\tau_P^D}\right),$$

где  $A_{Q,R,P}$  – амплитудные множители, зависящие от молекулярной рефракции ФХ (Q) и продуктов его трансформации (R – промежуточный фотопродукт – семихиноновые радикалы, P – стабильный фотопродукт, связанный с полимерными цепями),  $\tau_{Q,R,P}^D$  – времена диффузионной релаксации соответствующих этим компонентам парциальных решёток, обратно пропорциональные их коэффициентам диффузии, а  $\tau_R$  – время жизни радикалов. Соответствующие приведённому выражению зависимости фазовой модуляции голографических решёток с различными пространственными периодами выглядят следующим образом (рис. 36):

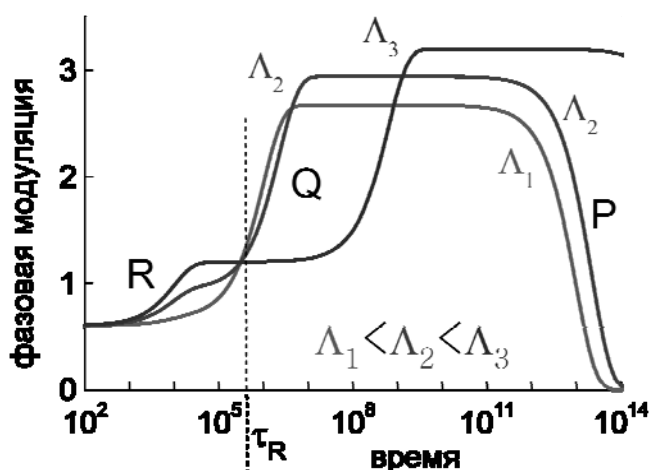


Рис.36. Изменение со временем фазовой модуляции голограмм с пространственными периодами  $L_1 < L_2 < L_3$ , записанных в материале с диффузионным проявлением. Буквами R, Q, P отмечены этапы развития голограмм, на которых основную роль в изменении фазовой модуляции играют соответственно радикалы, ФХ и конечный (стабильный) продукт его трансформаций.

Как правило, при исследовании голографических решёток, особенно объёмных, измеряются характеристики дифрагирующего на них или прошедшего через них света, а не рассматривается микроскопическая струк-

тура самой голограммы. В этой связи, возможно, интересно будет в заключение обсуждения голографической памяти и голографических материалов посмотреть на то, как объёмная голограмма (решётка), записанная в полимерном материале с ФХ, выглядит под микроскопом (рис. 37).

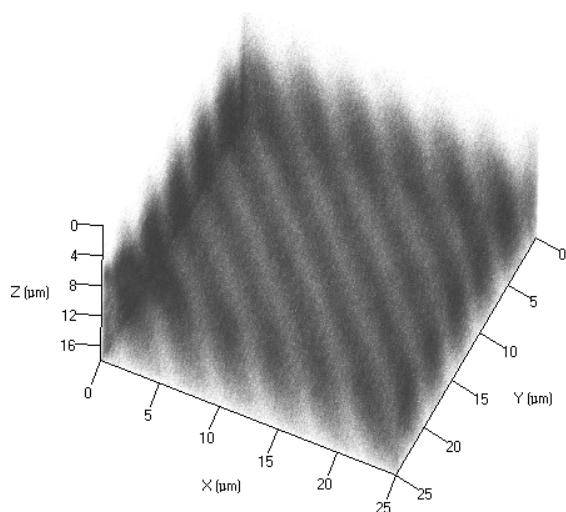


Рис.37. Микрофотография фрагмента объёмной голограммы\* с пространственной частотой  $300 \text{ мм}^{-1}$ , записанной в полимерном материале с фенантренхиноном. Интенсивность окраски тёмных участков соответствует концентрации продуктов фотоприсоединения ФХ к полимеру; изображение получено с помощью конфокального сканирующего микроскопа Zeiss LSM 710.

\* Голограмма любезно предоставлена О.В.Андреевой

## Перспективы систем оптической памяти

Оптической памяти на съёмных носителях, набравшей популярность с развитием технологии цифровых оптических дисков и применением её к хранению аудио- и видеозаписей, а также компьютерной информации, приходится выдерживать жёсткую конкуренцию не только с другими формами локального сохранения информации, такими как магнитная и полупроводниковая, но и с относительно новой концепцией распределённого хранения информации, которое становится всё более привлекательным с совершенствованием и широким распространением высокоскоростных сетевых технологий, в том числе беспроводных. Появляются новые технологии хранения информации, такие как "наномеханическая", по идее близкая к архаичной записи информации на перфокартах, но с использованием современной атомно-силовой техники демонстрирующая очень высокую плотность записи (0.3-0.5 Гбит/мм<sup>2</sup>), правда, при пока скромной скорости в 60 кбит/с.

Оптимизм в отношении архивных голографических систем заметно укрепился несколько лет назад благодаря сильному прогрессу элементной базы – прежде всего созданию новых светочувствительных материалов для объёмной голографии, таких как безусадочные фотополимеры от Aprilis и Inphase, а также лазеров, модуляторов, фотоприёмников. Известно несколько проработанных инженерных концепций, таких как, например, "коллинеарная голография, реализуемая в "универсальных голографических дисках" и "картах" (Holographic Versatile Disc, Holographic Versatile Card, Optware), но какие из них будут действительно распространены – это вопрос не только их научно-технических достоинств.

Прогресс неголографической дисковой памяти связывается с многослойными флуоресцентными дисками, ближнепольной записью и дальнейшим уменьшением рабочей длины волны, хотя бы до границ вакуумного ультрафиолета, а, возможно, когда-нибудь и до рентгеновской области.

Наряду с готовыми к использованию голографическими технологиями, существуют и подходы, выглядящие фантастическими, судя по заявляемым их создателями параметрам. Так, в связи с "атомной голографией" (Rewritable 3D Volume Atomic Holographic Optical Storage NanoTechnology, Colossal storage, inc.) говорят о записи УФ лазерами в электрооптических кристаллах 1 Тбит/мм<sup>2</sup>, или 40 Тбит/мм<sup>3</sup> информации при скорости передачи 10 Тбит/с.



## 2D- и 3D- системы отображения информации

### Основы колориметрии и фотометрии

Колориметрия – область науки и техники о восприятии и количественном измерении цвета.

Человеческий глаз способен воспринимать излучение в диапазоне длин волн от 400 нм до 700 нм, причем максимум световой чувствительности глаза смещается по спектру в зависимости от уровня освещенности, что объясняется наличием в глазу колбочек и палочек, отвечающих за дневное и ночное зрение, соответственно. Зависимость чувствительности глаза от длины волны излучения называется кривой видности ( $V_\lambda$ , рис.38). Кривая видности получена экспериментально на основании физиологических исследований и стандартизована Международной комиссией по освещению МКО (CIE, Commission Internationale d'Éclairage) как для дневного (яркость около  $100 \text{ кд/м}^2$ ), так и для ночного (яркость менее  $10^{-4} \text{ кд/м}^2$ ) зрения. При дневном (фотопическом) зрении с участием только колбочек максимум световой чувствительности соответствует длине волны  $\lambda = 555 \text{ нм}$ , при ночном (скотопическом) зрении с участием только палочек максимум чувствительности смещается в коротковолновую область:  $\lambda = 507 \text{ нм}$ . Кривая видности нормирована на единицу, за которую принята чувствительность  $V_\lambda$  при длине волны, соответствующей максимальной чувствительности глаза ( $\lambda=555 \text{ нм}$ ).

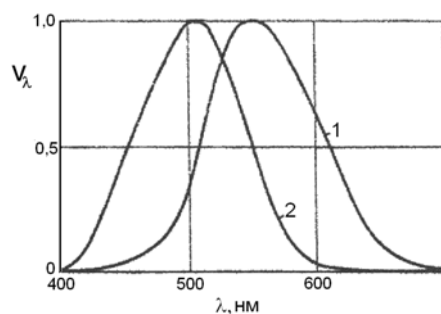


Рис.38. Кривые спектральной чувствительности глаза: 1 – при яркости  $100 \text{ кд/м}^2$ ; 2 – при яркости  $10^{-4} \text{ кд/м}^2$

Фотометрия – раздел оптики, в котором рассматриваются энергетические характеристики оптического излучения в процессах его испускания, распространения и взаимодействия с веществом. Энергетические величины в фотометрии характеризуют энергетические параметры оптического излучения без учета особенностей его воздействия на тот или иной приемник излучения. В отличие от энергетических, световые величины в фото-

метрии учитывают спектральную чувствительность глаза и используются только для видимого диапазона спектра. Основной световой единицей является сила света  $I$ , измеряемая в канделах (кд). Одна кандела соответствует силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \times 10^{12}$  Гц (длина волны  $\lambda = 555$  нм), энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/ср. Энергетическая сила излучения  $I_e$  - величина, равная отношению потока излучения  $\Phi_e$  точечного источника к телесному углу  $\Omega$  в пределах которого это излучение распространяется. Единицей энергетической силы света является ватт на стерадиан (Вт/ср).

Основными энергетическими величинами являются:

- 1) Поток излучения  $\Phi_e$  – величина, равная отношению энергии  $W$  излучения ко времени  $t$ , за которое это излучение произошло. Единица потока излучения – Ватт (Вт). Световой величиной, аналогичной потоку излучения, является световой поток. За единицу светового потока  $\Phi$  принят люмен (лм). Один люмен соответствует световому потоку, испускаемому точечным источником силой света в одну канделу внутри телесного угла 1 ср ( $1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \times \text{ср}$ ).
- 2) Энергетическая светимость  $R_e$  – величина, равная отношению потока излучения  $\Phi_e$ , испускаемого поверхностью, к площади сечения  $S$ , сквозь которое этот поток проходит (поверхностная плотность потока излучения). Единицей энергетической светимости является ватт на метр квадратный (Вт/м<sup>2</sup>). Световой величиной, аналогичной энергетической светимости является светимость  $R$  - суммарный поток, посылаемый светящейся площадкой с площадью  $S$ . Единицей светимости является люмен на метр квадратный (лм/м<sup>2</sup>).
- 3) Энергетическая яркость  $V_e$  – величина, равная отношению энергетической силы света  $\Delta I_e$  элемента излучающей поверхности к площади  $\Delta S$  проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения. Единица энергетической яркости – ватт на стерадиан на метр квадратный (Вт/(ср×м<sup>2</sup>)). Световой величиной, аналогичной энергетической яркости является яркость  $V_\phi$ . Яркость светящейся поверхности в некотором направлении  $\phi$  есть величина, равная отношению силы света  $I$  в этом направлении к площади  $S$  проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению. Единица яркости – кандела на метр квадратный (кд/м<sup>2</sup>).
- 4) Энергетическая освещенность  $E_e$  – характеризует величину потока излучения, падающего на единицу освещаемой поверхности. Единицей энергетической освещенности является ватт на метр квадратный (Вт/м<sup>2</sup>). Световой величиной, аналогичной энергетической освещенности является освещенность  $E$  – величина, численно равная отношению светового потока  $\Phi$ , падающего на поверхность к площади этой поверхности  $S$ . Единица освещенности – люкс ( $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм}/\text{м}^2$ ).

Спектральная плотность потока излучения может быть рассчитана по формуле:  $\Phi_\lambda = d\Phi / d\lambda$  (Вт/м<sup>2</sup>), где  $\lambda$  – спектральный интервал длин волн, в котором находится рассматриваемая величина.

Световой поток излучения, имеющего сплошной спектр, может быть вычислен по формуле:

$$\Phi = 683 \times \int_{380}^{780} V_\lambda \times \Phi_\lambda d\lambda, \text{ (Лм)}$$

Для излучения с линейчатым спектром световой поток рассчитывается следующим образом:

$$\Phi = 683 \times \sum_{n=1}^{n=i} V_{\lambda n} \times \Phi_n, \text{ (Лм)}$$

Для количественной оценки и сравнения различных цветов используют формулы, позволяющие однозначно описать видимые человеком цвета и отобразить их на плоскости в виде цветового «треугольника» (рис.39). Цветовой треугольник (или локус) разработан МКО в 1931 году и строится по трем координатам X, Y и Z ( $X+Y+Z=1$ ), которые могут быть вычислены по следующим формулам:

$$X = \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) \times \Phi(\lambda) d\lambda,$$

$$Y = \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) \times \Phi(\lambda) d\lambda,$$

$$Z = \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) \times \Phi(\lambda) d\lambda,$$

где  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  - значения функций соответствия цветов или функции сложения цветов единичной мощности.  $\Phi(\lambda)$  - функция распределения светового потока по спектру. Значения функций соответствия цветов ( $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ ) табулированы МКО на основании экспериментальных исследований спектральной чувствительности глаза.

На рис. 39 изображен цветовой треугольник CIE образца 1931 года. Помимо версии 1931 года существуют и другие варианты описания цветового треугольника, разработанные МКО в 1960, 1964 и 1976 годах.

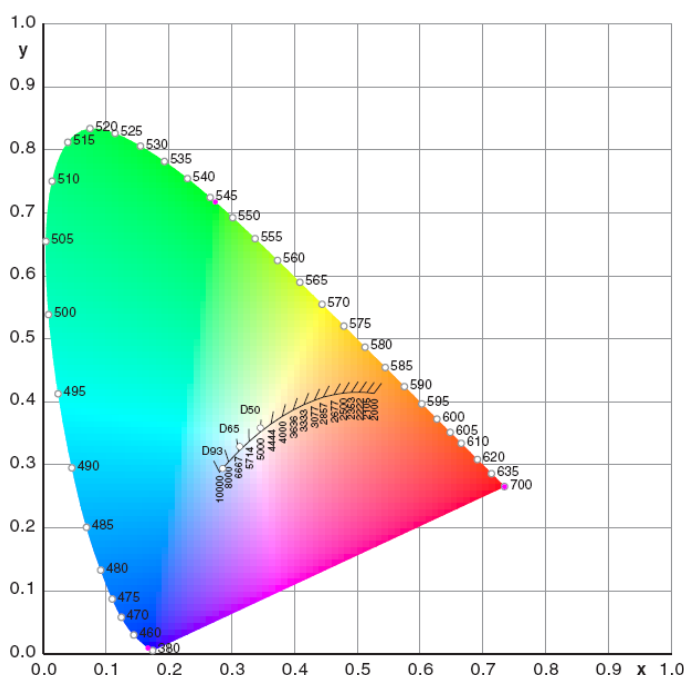


Рис.39. Цветовой «треугольник» МКО 1931 года

Огибающая кривая линия соответствует спектрально «чистым» (монокроматическим) цветам (от 380 нм до 700 нм). Точка с координатами  $X=0,33$   $Y=0,33$  соответствует «белому» (спектрально неокрашенному) цвету.

В случае, когда излучение имеет линейчатый спектр, в уравнениях цветовых координат интеграл заменяется суммой отдельных спектральных составляющих. Зная координаты цветности  $X, Y$  можно определить с помощью цветового треугольника МКО цветовой тон излучения, то есть преобладающую в излучении длину волны. Для этого, полученную в соответствии с координатами цветности  $X, Y$  точку  $O$  (рис.40) наносят на цветовой график МКО и соединяют её прямой линией с точкой  $E$ , которая соответствует белому цвету ( $X=0,33$   $Y=0,33$ ). Продолжение этой линии до пересечения с огибающей кривой спектрально чистых цветов даст значение искомой длины волны (точка  $L$  на рис.40). Более насыщенным является тот цвет, координаты которого находятся дальше от точки белого цвета. Количественно, насыщенность  $p$  будет определяться как отношение длин отрезков  $p = EO / EL$ .

Результат воздействия излучения любого спектрального состава будет приводить к ощущению восприятия того или иного цвета, насыщенность которого будет зависеть от ширины диапазона длин волн в котором работает излучатель. Температура, при которой абсолютно черное тело из-

лучает свет такого же спектрального состава, как рассматриваемый свет, называется *цветовой температурой*. Она указывает только на спектральное распределение энергии излучения, а не на температуру источника. Цветовая температура выражается в Кельвинах (К). Так, свет голубого неба соответствует цветовой температуре около 12000—25000 К. На рис.40 представлены результаты расчета цветковых координат излучения абсолютно черного тела для разных температур от 2000 К до 10000 К. Расчеты показывают, что энергия видимого излучения абсолютно черного тела с различной температурой – 2000, 4000, 6000, 8000, 1200 К – составляет соответственно 0.017; 0.318; 0.497; 0.477; 0.186 часть от полной энергии излучения. Следовательно, с точки зрения освещенности наиболее энергетически выгодной температурой будет 6000 К, при которой половина всей энергии приходится на видимое излучение.



Рис.40. Стандартные источники света МКО

Ввиду неопределенности белого света введено несколько стандартных источников света, которые называются источниками: А, В, С, D и E (рис.40). Опорный белый — это точка равных энергий  $E(x = 0.333, y = 0.333)$ , а стандартные источники МКО —  $A(0.448, 0.408)$ ,  $B(0.349, 0.352)$ ,  $C(0.310, 0.316)$ ,  $D_{6500}(0.313, 0.329)$ . Источник А аппроксимирует теплый цвет газонаполненной лампы накаливания с вольфрамовой нитью при 2856 К. Он намного «краснее» остальных. Источник В соответствует солнечному свету в полдень (4874 К), а С — полуденному освещению при сплошной облачности (6774 К). Источник С принят в качестве опорного белого цвета Национальным комитетом по телевизионным стандартам (NTSC). Источник  $D_{6500}$ , соответствующий излучению абсолютно черного тела при 6504 К, несколько зеленее. Он применяется в качестве опорного белого цвета во многих телемониторах.

Цветовой тон – основной признак цвета, характеризующий отличие одного цвета от другого и качественно определяемый понятиями (названиями, словами), например, синий, алый, оранжевый и т.д. Натренированный человек способен различать порядка 180 цветовых тонов. Белый, черный и серый цвета не имеют цветового тона, они называются ахроматическими. Все остальные цвета, имеющие цветовой тон, называются хроматическими. Цветовой тон – субъективная, обусловленная свойствами зрительного восприятия человека характеристика цвета соответствующего излучения, объективной характеристикой которой является длина волны.

Насыщенность цвета – степень субъективного восприятия цветового тона, т.е. величина, показывающая, насколько данный конкретный цвет отличается от белого или серого. Эта характеристика цвета соответствует характеристике излучения – чистоте цвета. То есть, если любой цвет оптически сложить с белым, цветовой тон останется неизменным, однако визуально они будут отличаться. Поэтому можно считать, что насыщенность есть ощущение чистоты цвета. У цветов одного тона человек способен различить до 25 градаций по насыщенности.

Светлота цвета – субъективный признак цвета, характеризующий вызываемое им ощущение яркости. Яркость рассматриваемой поверхности определяет интенсивность воздействующего на глаз излучения (интенсивность светового раздражения глаза), от которого зависит сила светового ощущения. Мера светового ощущения – светлота. Яркость – объективная величина, и ее можно измерять соответствующими приборами. Для светлоты же имеет смысл лишь сравнение при рассмотрении группы предметов, в процессе которого определяется уровень светлоты одного из предметов по отношению к другому. Фотометрическая яркость (световой поток с единицы площади светящейся поверхности) зависит от освещенности и отражательной способности (оптической плотности поверхности). Светлота, кроме этого, зависит от цветового тона и насыщенности. В частности, при прочих равных условиях синие цвета имеют меньшую светлоту (кажутся более темными), чем желтые и зеленые, а красные занимают промежуточное положение. Четкая зависимость существует также между светлотой и насыщенностью: с увеличением насыщенности светлота уменьшается. Поэтому, к примеру, насыщенно-синий цвет воспринимается как темно-синий. Светлота – единственный признак цвета, который имеют и хроматические цвета и ахроматические. По этому и только по этому признаку можно эти цвета сравнивать друг с другом. Насыщенность ахроматического цвета составляет 0%, а его светлота равна интенсивности этого света. Количество градаций светлоты зависит от уровня освещенности: при

пониженной человек может различить порядка 20 градаций, при повышенной - до 64.

Примерное соотношение длин волн и цветов представлено в табл.5:

Таблица 5. Соотношение длин волн и воспринимаемого цвета

| Диапазон длин волн | Восприятие цвета     |
|--------------------|----------------------|
| 390 нм - 440 нм    | <i>фиолетовый</i>    |
| 440 нм - 480 нм    | <i>синий</i>         |
| 480 нм - 510 нм    | <i>голубой</i>       |
| 510 нм - 550 нм    | <i>зеленый</i>       |
| 550 нм - 575 нм    | <i>желто-зеленый</i> |
| 575 нм - 585 нм    | <i>желтый</i>        |
| 585 нм - 620 нм    | <i>оранжевый</i>     |
| 630 нм - 770 нм    | <i>красный</i>       |

Свет, излучаемый обычными источниками, а также свет, отраженный от несветящихся тел, всегда имеет сложный спектральный состав, то есть состоит из суммы различных монохроматических излучений. Один и тот же цвет может быть получен смешением различных излучений. Цвета излучений, имеющие различный спектральный состав, но визуально воспринимающиеся одинаковыми, называются *метамерными*. Зрительная система способна различать примерно 350000 цветов.

Цвета, с помощью которых воспроизводится цветное изображение, называются основными цветами. В качестве основных цветов могут быть выбраны самые различные сочетания из трех цветов. В соответствии со спектральной чувствительностью глаза и трехкомпонентной теорией зрения, в качестве основных цветов чаще всего принимают синий, зеленый и красный (RGB) или желтый, пурпурный и голубой (YMC). Для получения желаемого цвета, например, на экране монитора, с использованием аддитивной системы сложения цветов RGB, в которой используются три основных (базовых) источника света, при смешении их в нужном соотношении интенсивностей можно получить любой цвет, координаты которого лежат в пределах треугольника, образованного точками с координатами XR-YR, XG-YG, XB-YB (точки R, G и B на рис.39). Координаты основных цветов, принятые в МКО указаны в табл.6.

Таблица 6. Координаты цветности МКО для основных цветов RGB

|          |         | <b>x</b> | <b>y</b> |
|----------|---------|----------|----------|
| Основные | Красный | 0.735    | 0.265    |

|                              |         |       |       |
|------------------------------|---------|-------|-------|
| цвета МКО<br>XYZ             | Зеленый | 0.274 | 0.717 |
|                              | Синий   | 0.167 | 0.009 |
| Стандарт<br>NTSC             | Красный | 0.670 | 0.330 |
|                              | Зеленый | 0.210 | 0.710 |
|                              | Синий   | 0.140 | 0.080 |
| Цветной<br>монитор на<br>ЭЛТ | Красный | 0.628 | 0.346 |
|                              | Зеленый | 0.268 | 0.588 |
|                              | Синий   | 0.150 | 0.070 |

### Двумерные дисплеи

Двумерные, или 2D-дисплеи, характеризуются следующими основными параметрами:

- 1) **Контраст** (или **контрастность**). Контрастность численно равна отношению яркости наиболее светлого участка изображения к яркости темного. Чем выше это отношение - тем больше контрастность.
- 2) **Угол обзора**. Наилучшим изображение будет при просмотре под прямым углом. При отклонении от этого положения в той или иной степени уменьшается яркость и контрастность, изменяются цветовые оттенки. Обычно под углом обзора конкретного дисплея понимают тот угол отклонения от нормали (по горизонтали или вертикали), при котором контрастность изображения не опускается ниже уровня 10:1 (или 5:1, если это оговорено особо). Дисплеи на основе ЭЛТ (электронно-лучевых трубках) имеют наибольшие углы обзора как с точки зрения контраста изображения, так и его цветности. Современные ЖК мониторы достигли величины  $178^\circ$  как по горизонтали, так и по вертикали, однако эти показатели справедливы только для контраста, в то же время цветопередача при таких углах существенно хуже, чем при наблюдении по нормали.
- 3) **Разрешение**. Под разрешением дисплея обычно понимают максимальное количество элементов изображения (пикселей), содержащееся в матрице дисплея. Ниже приведены некоторые стандартные разрешения экрана, согласно стандартам VESA (Video Electronics Standards Association, ассоциация стандартизации видеоэлектроники): VGA (Video Graphics Array) 640x480; SVGA (Super VGA) 800x600; XGA (eXtended Graphics Array) 1024x768; SXGA (Super XGA) 1280x1024; SXGA+, 1400x1050; WXGA+ (Wide XGA+) 1440x900; WSXGA+ (Wide SXGA+) 1680x1050; UXGA (Ultra XGA); 1600x1200; WUXGA (Wide UXGA) 1920x1200; QXGA (Quad XGA) 2048x1536.
- 4) **Яркость** дисплея характеризуется отношением силы света, излучаемого поверхностью экрана, к площади ее проекции на плоскость, перпендикулярной оси наблюдения. Единица измерения яркости



(СИ): кд/м<sup>2</sup>. В современных дисплеях яркость может регулироваться вручную или автоматически в зависимости от внешней освещенности.

- 5) Размер пикселя. Физический размер пикселя, состоящего (в случае цветного дисплея) из субпикселей основных цветов (RGB или CMY). Чем меньше размер пикселя, тем выше (лучше) разрешающая способность дисплея, т.е. тем больше деталей включает изображение.
- 6) Формат (отношение ширины к высоте дисплея). В настоящее время существуют пять основных форматов дисплеев. Форматы 5:4 и 4:3 используют в основном для производства мониторов, формат 3:2 используется для телевизоров стандартного вещания, а форматы 16:10 и 16:9 – для широкоформатных мониторов и телевидения с высоким разрешением (HDTV).

Кроме этого следует учитывать и такие параметры дисплея как энергопотребление, долговечность и себестоимость производства.

ТСО (профсоюз Швеции) занимается регламентацией ИТ-оборудования, в частности видеодисплеев, с конца 80-х годов 20-го века. В 1998 г. этой работой занялась группа TCO Development, дочерняя фирма TCO. Используя коллективные знания и опыт более миллиона офисных служащих, сотрудничающих с профсоюзом TCO, эта группа разработала требования и методики тестирования офисного компьютерного оборудования. Данные требования, определяющие качество и экологическую безопасность, сейчас являются всемирно признанным стандартом. Система сертификации TCO — это рекомендации для тех производителей, которые хотят приспособить средства вычислительной техники к реальным потребностям потребителей.

Первый вариант системы TCO был запущен в 1992 г., сменяясь затем новыми версиями – TCO'95, TCO'99, каждая из которых вносила всё больший охват требований и всё большую их строгость в соответствии с научно-техническим прогрессом. TCO'03, принятый в ноябре 2002 г., знаменует четвёртое поколение TCO. Его основные разделы преимущественно совпадают с ранними версиями, но по количеству и характеру требований имеются существенные отличия, особенно в части визуальной эргономики, как наиболее проблемной и быстро развивающейся в последние годы. Перечень рекомендованных параметров соответствия включает такие характеристики, как: яркость дисплея и его равномерность, размеры пикселя, контрастность, углы обзора, эргономику и многое другое.

В настоящее время основными типами дисплеев являются:

- 1) Вакуумные лампы
- 2) Вакуумные флуоресцентные дисплеи
- 3) ЭЛТ дисплеи
- 4) LED и OLED дисплеи
- 5) ЖК дисплеи

- 6) Плазменные дисплеи
- 7) SED и FED дисплеи

Вакуумные лампы и вакуумные флуоресцентные дисплеи применяются в основном для буквенно-цифровой индикации и в настоящее время постепенно вытесняются с рынка ЖК, LED и OLED дисплеями, обладающими существенно лучшими характеристиками.

#### ЭЛТ-дисплеи (электронно-лучевые трубки)

История ЭЛТ началась почти 150 лет назад. В 1859 году Юлиус Плюккер открыл катодные лучи. Через 20 лет, в 1879 году Уильям Крукс создал прообраз электронной трубки и установил, что катодные лучи распространяются линейно, но могут отклоняться магнитным полем.

В 1895 году Карл Фердинанд Браун на основе трубки Крукса создал катодную трубку, получившую названия трубки Брауна. Луч отклонялся магнитным полем только в одном направлении. В 1906 году сотрудники Брауна М. Дикман и Г. Глаге получили патент на использование трубки Брауна для передачи изображений. В 1907 году профессор Петербургского технологического института Б. Л. Розинг подал в патентное ведомство России заявку на патент (тогда его называли привилегией) "Способ электрической передачи изображений". В 1909 году М. Дикман опубликовал статью, в которой описал фототелеграфное устройство для передачи изображений с помощью трубки Брауна. В 1911 году Б.Л. Розинг продемонстрировал передачу телевизионных изображений простых геометрических фигур и приём их с воспроизведением на экране ЭЛТ. В 1936 г. П.В. Тимофееву и П.В. Шмакову (СССР) было выдано авторское свидетельство на электронно-лучевую трубку с переносом изображения. Первый телевизор индивидуального пользования КВН-49 (СССР). Размер экрана составлял 105×140 мм, формат экрана 4:3. Выходная звуковая мощность равнялась 1 Вт. Потребляемая мощность - 220 Вт. Габариты телевизора КВН-49 составляли - 380×490×400 мм, масса - 29 кг. Для увеличения размера изображения перед кинескопом можно было установить пластмассовую линзу, которая заполнялась водой. В 1938 г. в СССР были пущены в эксплуатацию первые опытные телевизионные центры в Москве и Ленинграде. 7 ноября 1948 г. Московский телецентр приступил к регулярному телевизионному вещанию по новому стандарту разложения изображения на 625 строк, который в дальнейшем был принят и в большинстве европейских стран. В 1956 году в Москве в концертном зале "Эрмитаж" был установлен телевизионный экран размером 3×4 м. Схемы усиления и развертки, источник питания на 75 кВ, установка, отладка и эксплуатация телевизионного комплекса были выполнены сотрудниками Московской телевизионной лаборатории, расчет зеркально-линзового объектива диаметром 600 мм и светосилой 1:0,6 был проведен в ГОИ им. Вавилова, объектив изготовлен в ЛОМО, проекционный кинескоп диа-

метром 9" (22.5 см) с напряжением на ускоряющем аноде 75 кВ разработан в ОКБ электровакуумных приборов. Эта аппаратура по характеристикам не уступала лучшим зарубежным образцам, а объектив и ЭЛТ по параметрам превосходили все известные модели. Аппаратура эксплуатировалась как телетеатр в течение двух лет.

В 1960–1963 годы в Московском телевизионном институте впервые в мире на отечественной элементной базе была создана аппаратура замкнутого телевидения на 1125 строк, 25 кадров/50 полукадров в секунду – "Телесвязь".

Устройство современного ЭЛТ дисплея изображено на рис.41. Электронные лучи, отклоняясь магнитным полем, попадают через маску на слои люминофора с различным спектром свечения, как правило, в красной, зеленой и синей областях спектра (RGB). Изменение соотношения интенсивностей близко расположенных RGB элементов (пикселей) приводит к излучению света заданного цветового оттенка. ЭЛТ дисплеи характеризуются высоким контрастом, большими углами обзора и великолепной цветопередачей. Однако, их применение, сначала как мониторов для компьютеров, а затем и как телевизоров, постепенно снижается из-за сильной конкуренции со стороны ЖК-дисплеев (мониторы и телевизоры) и плазменных панелей (телевизоры). Основными недостатками, из-за которых ЭЛТ теряют потребителя, являются их относительно большие габариты и вес, а также относительно высокое энергопотребление.

Изобретение лазера привело к созданию Н.Г. Басовым, О.В. Богданкевичем и А.С. Насибовым в 1967 году лазерной электронно-лучевой трубки. Эта трубка позволила создать у проекционных устройств рекордно высокий световой поток (до 12000 лм) и, значит, формировать яркое изображение большого размера. Но из-за большого анодного напряжения и необходимости применять специальные системы охлаждения эти лазеры не дошли до потребителя. Сейчас в Физическом институте РАН им. П.Н. Лебедева продолжаются работы по созданию компактных лазерных ЭЛТ с низким энергопотреблением. Лазерные ЭЛТ (квантоскопы) изготавливаются по уникальной технологии, не имеющей аналогов в мире. В ФИАНе впервые использовали для полупроводниковых мишеней этих трубок эпитаксиальные структуры с многоквантовыми ямами на основе InGaP/AlInGaP, что позволяет увеличить в некоторых режимах мощность излучаемого светового пучка до 7 Вт.

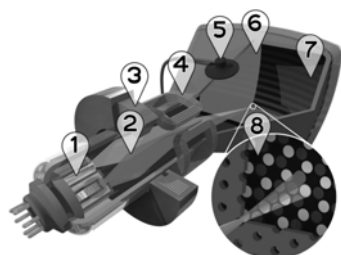


Рис.41. Устройство современного ЭЛТ дисплея:

1) электронные пушки, 2) электронные лучи, 3) фокусирующая катушка, 4) отклоняющие катушки, 5) анод, 6) маска цветоделения, 7) красные, зелёные и синие зёрна люминофора, 8) маска и зёрна люминофора (увеличено).

### Жидкокристаллические дисплеи

В 1888 году Фридрих Райницер (Reinitzer) обнаружил жидкокристаллический характер холестерина, извлеченного из моркови. В 1904 году Отто Леманн публикует свою работу "Жидкие кристаллы". В 1911 году Чарльз Могуин (Mauguin) проводит первые эксперименты с тонкими слоями жидких кристаллов между пластинами. В 1922 г. Жорж Фридель описывает структуру и свойства жидких кристаллов и классифицирует их по 3-м типам (нематики, смектики и холестерики). В 1926–1929 годы В.К. Фредерикс, старший инженер-физик Физико-технического института (Ленинград), вместе со своими аспирантами провел ряд экспериментов, выявивших изменение оптических свойств анизотропных жидкостей (жидких кристаллов, ЖК) под действием приложенного магнитного поля. Это явление, называемое теперь переходом Фредерикса, используется сейчас в современных ЖК-дисплеях.

В 1936 году компания Маркони патентует "жидкокристаллический световой затвор".

1962: первая крупная публикация по ЖК "Молекулярная структура и свойства жидких кристаллов", автор д-р Джордж Грей.

В 1962 году Ричард Уильямс (RCA) исследовал электро-оптические свойства ЖК и продемонстрировал способ управления ЖК с помощью приложенного напряжения. В конце 1964 года Джордж Хайлмайер (Heilmeyer) реализовал первый ЖК дисплей на основе эффекта, который он назвал: динамический режим рассеяния (DSM). DSM дисплеи могут работать в прозрачных и светоотражающих режиме, но они требуют значительных текущих потоков их функционирование. В 1970 году была подана заявка на патент от Hoffmann-La Roche в Швейцарии (швейцарский патент № 532 261). Производство ЖК дисплеев для наручных часов началось в 1970-х годах в Швейцарии, а затем в Японии на основе TN-

технологии, которая вскоре заменила технологию DSM в связи с более экономичным потреблением энергии.

В 1972 году первый активно-матричный ЖК дисплей был выпущен в США. в 1986 году NEC выпустила первый портативный компьютер с ЖК-дисплеем. В 1995 году диагональ ЖК-панелей превысила 28" (71 см). В 2007 году впервые объем продаж ЖК дисплеев по всему миру превысил объем продаж ЭЛТ.

Уже к 2008 году доля ЖК-дисплеев составила 50% рынка (~200 миллионов телевизоров в год).

### Устройство и принцип действия ЖК дисплея

ЖК дисплей состоит из электроники, обрабатывающей входной видеосигнал, ЖК матрицы, модуля подсветки, блока питания и корпуса. Типичная структура ЖК дисплея изображена на рис.42. Каждый пиксель ЖК дисплея состоит из слоя молекул жидкого кристалла между двумя прозрачными электродами, и двух поляризационных фильтров, плоскости поляризации которых (как правило) перпендикулярны. В отсутствие жидких кристаллов свет, пропускаемый первым фильтром, практически полностью блокируется вторым.

Поверхность электродов, контактирующая с жидкими кристаллами, специально обработана для изначальной ориентации молекул в одном направлении. В TN-матрице эти направления взаимно перпендикулярны, поэтому молекулы в отсутствие напряжения выстраиваются в винтовую структуру (рис.42). Эта структура преломляет свет таким образом, что до второго фильтра плоскость его поляризации поворачивается, и через него он проходит уже без потерь. Если не считать поглощения первым фильтром половины неполяризованного света - ячейку можно считать прозрачной. Если же к электродам приложено напряжение - молекулы стремятся выстроиться в направлении поля, что искажает винтовую структуру. При этом силы упругости противодействуют этому, и при отключении напряжения молекулы возвращаются в исходное положение. При достаточной величине поля практически все молекулы становятся параллельны, что приводит к непрозрачности структуры. Варьируя напряжение, можно управлять степенью прозрачности. Если постоянное напряжение приложено в течение долгого времени – жидкокристаллическая структура может деградировать из-за миграции ионов. Для решения этой проблемы применяется переменный ток, или изменение полярности поля при каждой адресации ячейки (непрозрачность структуры не зависит от полярности поля). Проходящий через ячейки свет может быть естественным - отражённым от подложки (в ЖК дисплеях без подсветки). Но чаще применяют дополнительный источник света, кроме независимости от внешнего

освещения это также стабилизирует свойства полученного изображения. Матрица монитора может подсвечиваться люминесцентными лампами или светодиодами. Ресурс источников светодиодной подсветки (светодиодов) примерно в 3 раза выше. Таким образом, ЖК-дисплей состоит из электроники, обрабатывающей входной видеосигнал, ЖК матрицы, модуля подсветки, блока питания и корпуса.

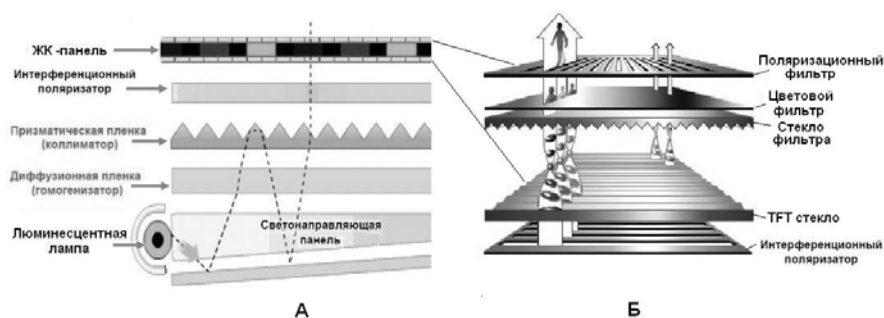


Рис.42. Структура (А) и принцип действия (Б) ЖК дисплея

Наиболее распространенной и дешевой является технология дисплеев TFT LCD (Thin Film Transistor Liquid Crystal Display)

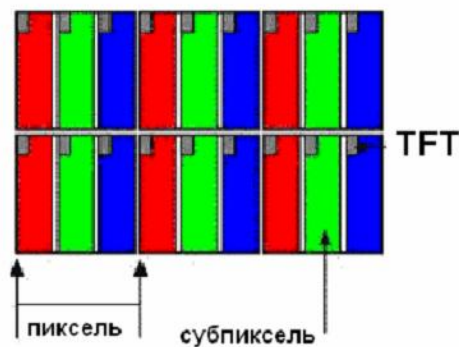


Рис.43. Структура пикселя ЖК дисплея

Каждый пиксель (элемент изображения) цветного ЖК дисплея состоит из 3 субпикселей (рис.43) основных цветов (RGB). Таким образом, при разрешении дисплея  $1280 \times 1024$  необходимо создать  $3840 \times 1024$  TFT транзистора и субпиксельных элемента. Размер пикселя дисплея TFT приблизительно равен 0.3 мм.

К достоинствам ЖК-дисплеев следует отнести экономичное потребление энергии, быстроедействие, малые габариты. Однако, ЖК-дисплеи имеют недостаточные углы обзора с точки зрения контраста и, особенно,

цветопередачи. Для устранения этих недостатков многие компании разрабатывают новые технологии, среди которых следует отметить технологию, развиваемую компаниями NEC, Hitachi и др.: IPS (In-Plane Switching), S-IPS (Super-IPS, Hitachi 1998 год), AS-IPS - технология Advanced Super IPS (NEC), A-TW-IPS - Advanced True White IPS (NEC), AFFS - Advanced Fringe Field Switching (Hitachi Displays).

IPS-технология позволила повысить качество цветопередачи (до 24 бит) и контраст, однако, быстродействие таких матриц меньше, чем TN-матриц.

Компании Fujitsu, Samsung, Sharp и др. развивают технологии MVA (Multi-Domain Vertical Alignment(Fujitsu), PVA (Samsung), ASV (Sharp) и Super MVA (CMO).

В результате были получены следующие результаты:

- хорошее быстродействие,
- глубокий черный цвет
- отсутствие винтовой структуры кристаллов и двойного магнитного поля.

Однако, в сравнении с IPS-технологией, эти матрицы характеризуются следующими недостатками:

- пропадание деталей в тенях при перпендикулярном взгляде,
- зависимость цветового баланса изображения от угла зрения.

### Светодиодные дисплеи

Светодиодные дисплеи (LED, light emitting display, светоизлучающий дисплей) состоит из набора светоизлучающих диодов, представляющих собой p-n переход в полупроводниковом материале (рис.44). Длина волны излучения определяется шириной запрещенной зоны этого полупроводника и энергетическим положением примесных уровней.

Преимущества светодиодов:

- 1) Светодиоды производят больше света на ватт, чем лампы накаливания.
- 2) Светодиоды могут излучать спектрально насыщенные цвета без использования цветных фильтров.
- 3) Светодиоды могут быть сконструированы так, чтобы концентрировать свет без использования внешнего отражателя.
- 4) Светодиод загорается очень быстро. Типичный красный светодиодный индикатор достигает полной яркости за микросекунды. Светодиоды, используемые в коммуникационных устройствах, могут иметь еще более короткое время отклика.
- 5) Свечение светодиода гаснет постепенно, а не резко, как у ламп накаливания.
- 6) Светодиоды могут иметь относительно длительный срок эксплуатации, от 35000 до 50000 часов. Лампы дневного света, как правило, из-

лучают около 30000 часов, а лампы накаливания 1000-2000 часов.

- 7) Светодиоды малогабаритны и легко интегрируются в полупроводниковые микросхемы.

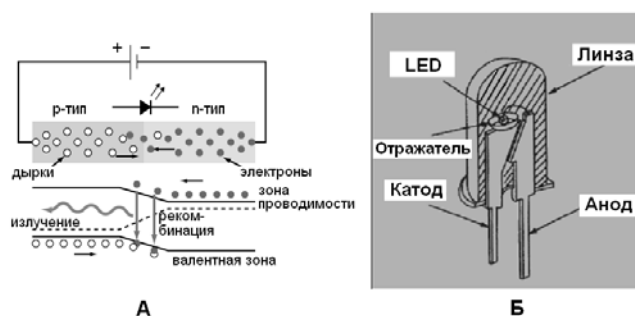


Рис.44. Принцип действия (А) и конструктивное исполнение (Б) светоизлучающего диода.

Из недостатков LED можно перечислить следующие:

- 1) Светодиоды в настоящее время более дороги в цене за люмен
- 2) Эффективность светодиода сильно зависит от температуры окружающей среды и от эксплуатационных условий. Поэтому, часто требуется принимать специальные меры по поддержанию стабильной рабочей температуры.
- 3) Светодиоды требуют стабилизированных источников питания
- 4) Большинство "белых" светодиодов имеют спектры, которые существенно отличаются от излучения черного тела, таких как солнце или свет лампы накаливания. Это может создавать проблемы для правильной цветопередачи.
- 5) Светодиоды не являются "точечными источниками" света, поэтому не могут использоваться в приложениях, нуждающихся в высокой направленности излучения (в отличие от лазеров).

LED широко используются для создания различного рода указателей, индикаторов, приборных панелей, а также уличных дисплеев большого формата с яркостью не менее 2000 кд/м<sup>2</sup>.

В течение последних нескольких лет все более широкое распространение получают OLED (Organic LED) -дисплеи. В качестве излучающего слоя светодиода используется органическое соединение. Чтобы функционировать как полупроводник, органический излучающий материал должен иметь сопряженные p-и n-связи. Это могут быть небольшие органические молекулы в кристаллической фазе, или полимер. По сравнению с обычными LED, OLED легче, а кроме этого, полимерные светодиоды могут иметь дополнительное преимущество быть гибкими (flexible), поэтому такую разновидность дисплеев называют FLED.



OLED-дисплеи обеспечивают яркость излучения от нескольких кд/м<sup>2</sup> (для ночной работы) до очень высоких яркостей — свыше 100000 кд/м<sup>2</sup>, однако рекомендуется работа при более умеренных уровнях яркости (до 1000 кд/м<sup>2</sup>). В отличие от ЖК- дисплеев, изображение на OLED-экране останется ярким и насыщенным при любом уровне освещенности (даже при прямом попадании солнечных лучей на дисплей). Поскольку OLED преобразовывают в свет приблизительно 25-30 % электроэнергии, энергопотребление OLED дисплеев примерно в полтора раза ниже, чем у ЖК- дисплеев, нуждающихся, кроме всего прочего, в дополнительном источнике подсветки (лампы или LED матрицы).

Таким образом, можно отметить следующие важные преимущества OLED в сравнении с ЖК-дисплеями:

- 1) меньшие габариты и вес
- 2) отсутствие необходимости в подсветке
- 3) отсутствие проблемы с углами обзора — изображение видно без потери качества с любого угла
- 4) быстроедействие (на порядок выше, чем у ЖК-дисплеев)
- 5) более качественная цветопередача и высокий контраст
- 6) более низкое энергопотребление при той же яркости
- 7) возможность создания гибких экранов

Ещё более экономичными с точки зрения энергопотребления являются так называемые PHOLED (Phosphorescent OLED). PHOLED используют принцип электрофосфоресценции, что позволяет преобразовать в излучение до 100 % электрической энергии. PHOLED предполагается использовать в больших дисплеях типа телевизионных мониторов или экранов для освещения интерьеров. Также к преимуществам PHOLED-дисплеев можно отнести достаточно продолжительный срок службы.

Среди возможных применений OLED можно выделить следующие:

- 1) Дисплеи для мобильных устройств и фото- и видео аппаратуры
- 2) Мониторы и телевизоры
- 3) Световые панели
- 4) Гибкие дисплеи

Существует проблема, связанная с необходимостью увеличения длительности непрерывной работы "синих" OLED. Поскольку время непрерывной работы "красных" и "зеленых" OLED существенно (на десятки тысяч часов) превосходит время работы синих, то, со временем происходит искажение цветопередачи изображения, недопустимое в коммерческих устройствах длительного срока эксплуатации (компьютерные мониторы, телевизоры итп.). В то же время, для дисплеев телефонов, фотокамер и видеокамер достаточно 5-10 тысяч часов непрерывной работы. Поэтому OLED-матрицы уже сегодня успешно используется в таких устройствах.

Можно считать это временными трудностями становления новой технологии, поскольку несомненно будут разработаны новые долговечные люминофоры в синей области спектра. Примером выхода OLED-дисплеев на «широкий» экран можно считать выпуск в 2007 году фирмой Sony первого OLED телевизора XEL-1 с диагональю экрана 11 дюймов. Вес XEL-1 с экраном толщиной 3 мм составляет всего 2 кг. Разрешение экрана - 960 × 540 пикселей, контраст -1000000:1. Потребляемая мощность - 45 ватт. Заявленный ресурс OLED-экрана - 30 тысяч часов (что соответствует 10 годам эксплуатации при 8 часах в день). На выставке электроники CES в 2009 году Sony представила прототип OLED-телевизора с 21-дюймовым экраном.

Первые серийные OLED-телевизоры представила в 2009 году и южнокорейская компания Samsung. О выпуске таких телевизоров заявил также ряд других производителей: LG, Philips, Toshiba и Panasonic.

### Плазменные дисплеи

Промышленное использование плазменной технологии началось в начале 90-х годов, однако исследования плазменных дисплеев проводились в США ещё в 60-х годах. Технология была разработана четырьмя учёными Битцером (Bitzer), Слоттоу (Slottow), Вилсоном (Willson) и Аророй (Aroga). Первый прототип дисплея появился в 1964 году. Матрица имела размер 4×4 пикселя, которые излучали монохромный голубой цвет. Затем, в 1967 году, размер матрицы был увеличен до 16×16 пикселей, на этот раз она излучала монохромный тёмно-красный цвет (с помощью неона). Цвет определялся подбором газов с различным спектром свечения. Сначала эти матричные панели назывались газоразрядными, но эффективность излучения в газах оказалась очень слабой. В настоящее время выпускаются матричные газоразрядные панели с аргон-неоновым заполнением.

Плазменная технология заинтересовала производителей, и в 1970 году к работе присоединились такие компании, как IBM, NEC, Fujitsu и Matsushita. В 1970–1980-е годы в рязанском НИИ газоразрядных приборов (ГРП) было изобретено несколько конструкций плазменных панелей на переменном токе, в том числе и с цветными пикселями. Сейчас в ОАО НИИ ГРП "Плазма" достигнуто лучшее в мире пространственное разрешение для плазменных панелей. Из-за отсутствия рынка, оправдывающего промышленное производство, к 1987 году разработки в США были практически остановлены. Основные исследования проводились в Японии, так как в Японии существовала долговременная государственная программа по развитию дисплейных технологий и там были образованы десятки университетов и институтов, специализированных на данной технологии. Государство контролировало и координировало деятельность больших частных фирм, таких как Sharp и Hitachi.

Первая коммерческая модель плазменного дисплея появилась на рынке в начале 90-х годов. Сегодня большинство крупных производителей бытовой электроники выпускают плазменные панели.

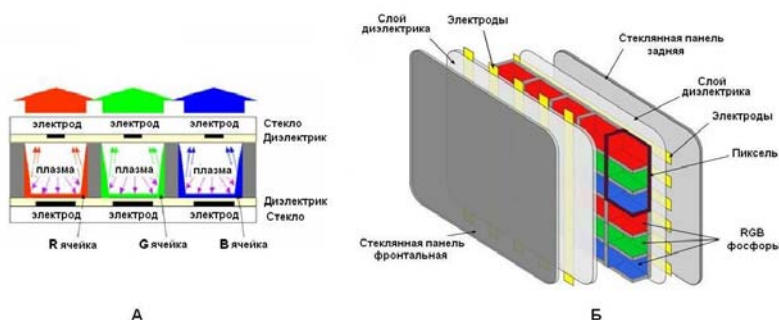


Рис.45. Принцип действия плазменного дисплея (А) и структура плазменной панели (Б).

Принцип работы плазменных дисплеев состоит в следующем: каждый субпиксель представляет собой микроскопическую флуоресцентную лампу, излучающую только один из основных цветов: красный, зелёный или синий. Регулируя яркость свечения лампы, можно получить различные оттенки. Свечение в плазменных дисплеях достигается точно так же, как у люминесцентных ламп: внутри трубки запаян инертный газ (к примеру, аргон), использующийся в качестве стабилизатора дугового разряда. Также внутри находятся пары ртути. На концах трубки находятся электроды, к которым подводится высокое напряжение (несколько тысяч вольт). Инертный газ в нормальном состоянии электрически нейтрален, но под действием тока он превращается в плазму - газ, состоящий из свободных электронов и положительных ионов. Из-за разницы потенциалов в несколько тысяч вольт электроны движутся к положительному катоду, а электроны – к отрицательному аноду трубки. Подобное движение приводит к столкновению с атомами. При каждом столкновении атом набирает энергию, и электроны переходят на более высокую орбиту. Когда они возвращаются на изначальную орбиту, то испускают фотон: квант света.

Излучаемый свет является результатом движения плазмы в условиях сильного электрического поля. Но приложения постоянного потенциала к полюсам трубки недостаточно. Внутри плазмы должно постоянно существовать движение, чтобы излучать свет, поэтому к полюсам прикладывается переменный ток. В итоге ионы газа движутся то в одну сторону, то в другую. Излучаемый плазмой свет невидим: это ультрафиолет, который имеет длину волны короче видимого спектра, поэтому его удобно с помощью разных люминофоров превращать в любой цвет. Для этого на стенки трубки наносят порошок, чувствительный к ультрафиолету и излучающий белый свет (люминофоры). Люминофоры давно используются в дисплеях.

Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) тоже применяют люминофоры, преобразующие поток электронов в зелёный, красный или синий свет.

Преимущества плазменных панелей:

- 1) Люминофоры для плазменного телевизора обеспечивают более сочные цвета в более широком диапазоне. Цветовой диапазон плазменных экранов намного шире, чем у ЖК телевизоров, но в ряде случаев уже, чем у ЭЛТ-мониторов, поскольку у ЭЛТ условия для возбуждения люминофора гораздо лучше: энергия электронов выше, чем у УФ излучения.
- 2) Углы обзора шире, чем у ЖК-дисплеев. Основной причиной является то, что пиксели в "плазме" как бы сами излучают свет, а у ЖК мониторов свет от лампы подсветки проходит через пиксель. Кроме того, плазменным панелям не нужен поляризатор.
- 3) Контрастность "плазмы" аналогична лучшим ЭЛТ-телевизорам. Основная тому причина - глубокий чёрный цвет. Выключенный пиксель не излучает цвет совсем, в отличие от пикселей ЖК. Кроме того, плазменные телевизоры обладают большей яркостью, чем ЭЛТ-мониторы, обеспечивая от 900 до 1000 кд/м<sup>2</sup>.
- 4) Плазменные дисплеи могут достигать больших размеров (с диагональю от 32" до 50") с минимальной толщиной. Это очень важное преимущество по сравнению с ЭЛТ-дисплеями, когда большой диагонали сопутствуют громоздкие габариты.

Существующие недостатки плазменных панелей следующие:

- 1) Большой размер пикселей. Достичь размера пикселя меньше 0.5 или 0.6 мм практически невозможно. Поэтому плазменные телевизоры с диагональю меньше 32" (82 см) попросту не существуют. Для обеспечения хорошего разрешения у производителей плазменных панелей нет другого выбора, кроме как повышать размер дисплея с 32 до 50 дюймов (с 82 до 127 см).
- 2) Динамический диапазон. Проблемы связаны с природой пикселей. Для излучения света пиксель плазмы требует электрического разряда. Он может либо гореть, либо не гореть, но промежуточного состояния нет. Потому для управления яркостью свечения производители используют метод импульсно-кодовой модуляции. Для получения более тёмного оттенка зажигать пиксель можно реже. Глаз человека не заметит отдельные вспышки и усреднит значение яркости. Если средние и яркие оттенки отображаются вполне прилично, то тёмные оттенки страдают от недостатка света - их очень трудно отличить друг от друга.
- 3) Мерцание плазменного дисплея (85-90 Гц) заметное для таких размеров дисплея. Проблема мерцания плазменных панелей также объясня-

ет, почему эта технология мало подходит для компьютерных мониторов.

- 4) Выгорание люминофора. Этот феномен связан с преждевременным старением люминофоров. Если они постоянно работают, то люминофоры стареют и становятся менее эффективными. Средний ресурс составляет 30000 часов, то есть 9 лет при 8 часах просмотра в день.
- 5) Плазменные дисплеи довольно дороги
- 6) Энергопотребление плазменных дисплеев, которое всегда выше, чем у ЖК мониторов. Например, 42" плазменный дисплей потребляет 250 Вт или даже больше, а ЖК-панель с той же диагональю – всего 150 Вт.

### SED и FED дисплеи

SED (Surface-conduction electron Emission Display) переводится как люминесцентные дисплеи с холодной эмиссией. По принципу действия SED напоминает ЭЛТ. Единственное отличие – источник электронов у первого не один, а по одному на каждый пиксель. Структурно SED-экран напоминает две скрепленные пластины, между которыми откачан воздух. На внутренней стороне одной панели нанесен люминофор (анод), на другой – тончайший излучающий слой (катод), представляющий из себя множество маленьких пирамидок. Если между двумя пластинами создать большую разность потенциалов, то большая напряженность электрического поля при напряжении 10 кВ заставит электроны лететь на противоположную сторону. Возбуждение люминофора потоком электронов вызывает свечение. За формирование изображения отвечает матрица, которая следит за каждым катодом. Сложность технологии заключается в том, что долгое время инженеры не могли создать идеально ровный слой пирамидок. И только в 2000 году в саратовском НИИ "Волга" была разработана технология формирования микрокатодов на основе тонких плёнок алмазоподобного углерода для FED (Field Emission Display). Принцип технологии заключается в том, формирование сетки катодов производится методом напыления тонких углеродных плёнок с последующей фотолитографией. Уже в 2002 году НИИ имел цветной дисплей с матрицей 64×64 пикселя.

FED-дисплеи активно используются японскими компаниями (лидером среди которых является Canon) в такой продукции, как сотовые телефоны, экраны для видеокамер и т.д. Но для начала серийного производства таких экранов компаниям пришлось преодолеть ряд технологических трудностей. В частности, выбор наилучшего материала для создания катодов и метод нанесения люминофора. Если с первой трудностью инженеры справились быстро, то со второй пришлось повозиться. В итоге, наносить слой люминофора стали при помощи модифицированного струйного принтера.

Итак, снижение затрат и повышение основных характеристик позволили производителям широко применять эти технологии при создании дисплеев. Основные характеристики FED-дисплеев:

- эффективность преобразования электрической энергии в световую составляет 5 лм/Вт (т.е. потребление энергии у таких панелей втрое меньше, чем у плазменных панелей и вдвое, чем у ЭЛТ);
- высокая яркость и контрастность изображения;
- неограниченный угол обзора;
- толщина в несколько миллиметров;
- простота технологии.

### Гибкие (flexible) дисплеи

Несмотря на очевидную привлекательность идеи создания гибкого дисплея оказалось, что придание гибкости традиционным типам ЖК дисплеев сопряжено с рядом трудностей. ЖК экран с активной матрицей состоит из двух слоев стекла и ряда компонентов, размещенных между ними. Слой тонкопленочных транзисторов (TFT) в аморфном кремнии вытравливается на нижней поверхности стекла, где формируются световые пиксели. Жидкокристаллический слой, выступающий в роли светового затвора, размещается сверху. Под дисплеем располагается подсветка, а механизм управления цветопередачей и поляризаторы занимают место выше дисплея. Создание гибкого дисплея предполагает исключение подсветки и замену стеклянных слоев какими-то гибкими материалами, например, пленкой из тонкого полимера. Сложность заключается в том, что жидкие кристаллы экрана весьма чувствительны к деформации на изгиб.

Ведутся поиски альтернатив аморфному кремнию — полупроводниковому материалу, используемому при изготовлении тонкопленочных транзисторов и включаемому в стеклянную подложку. В отличие от неорганических подложек, подобных аморфному кремнию, органические полупроводниковые материалы можно использовать в жидком состоянии, а это существенно упрощает технологический процесс. В настоящее время разрабатываются технологические процессы "струйной" печати транзисторов на тонком листе полимера.

Одним из перспективных направлений в области гибких дисплеев является технология так называемых бистабильных дисплеев ("электронная бумага"). Своё название эти дисплеи получили благодаря тому, что изображение на них сохраняется и при отключении питания. Отражающие дисплеи в отличие от ЖК экранов не требуют подсветки и могут широко использоваться вне помещений. Первое поколение подобных устройств применяется в качестве вывесок, ценников на магазинных полках, а также элементов оборудования для чтения электронных книг и даже электронных газет.

Среди производителей бистабильных дисплеев наиболее известна компания E Ink. Ее технология предполагает размещение тонкой пленки

поверх электронных чернил — группы черных и белых заряженных частиц или "пигментов", перемещающихся вверх и вниз внутри жидкости и формирующих таким образом черное, белое или серое изображение. На первом этапе производители дисплеев использовали технологию E Ink для воспроизведения электронных книг и создания устройств. На стадии изготовления они принимают форму какого-то объекта, но в окончательном варианте остаются жесткими. Компания Seiko, к примеру, разработала дисплей для наручных часов, а компания Lexar встраивает в карты памяти с USB-интерфейсом индикатор остающейся свободной памяти. Дисплеи E Ink используются также в гибких электронных носителях.

Компания Sipix Imaging использует аналогичную технологию для воспроизведения черного, зеленого или синего цвета на белом фоне. Разработчики голландской фирмы Polymer Vision совместно со специалистами Sipix и E Ink занимаются проектированием скручиваемого в рулон прототипа дисплея, получившего название Readius. Благодаря этому появляется возможность создания очень маленьких устройств с большими экранами. Выдвигающийся дисплей с диагональю 5 дюймов будет воспроизводить 16 оттенков серого. Изображение обновляется с частотой один кадр в секунду; это слишком медленно для перемещения по меню или вывода на экран видео, но вполне приемлемо для работы с портативной навигационной системой, просмотра новостей в сети или чтения электронной почты. В настоящее время в E-Ink занимаются созданием цветного фильтра для своей технологии. Ожидается, что он появится примерно в эти же сроки.

Ирландская компания NTeга разрабатывает гибкий бистабильный дисплей на основе нанохромной технологии. В RGB-дисплее NTeга цветные пиксели формируются путем придания каждой из частиц определенного заряда, а не за счет приведения частиц в движение, как в других технологиях. Конструкция построена на основе пассивной транзисторной матрицы с разрешением 200 точек на дюйм. В общем случае она работает медленнее активной матрицы, поскольку вместо отдельных пикселей на экране обновляется строка целиком. Однако в NTeга утверждают, что производительности данной технологии вполне достаточно для отображения коротких фрагментов видео. Они будут использоваться в качестве дополнительных экранов в сотовых телефонах или в графических планшетах, предназначенных для ввода информации.

Компания Kent Displays разрабатывает бистабильные жидкокристаллические дисплеи на базе холестерической технологии. В лаборатории Kent использование новой технологии демонстрировалось на пластике, бумаге и даже тканевых подложках. В нынешних дисплеях Kent используется относительно медленная пассивная матрица, поэтому сфера их применения ограничена в основном электронными книгами и информационными табло. Технология предусматривает использование

двухцветных комбинаций из желтого и черного или из синего и белого цветов. Устройства имеют небольшие размеры (диагональ варьируется от 1.5 до 2.5 дюймов) и поддерживают разрешение 100 точек на дюйм. В настоящее время инженеры Kent работают над созданием более быстрых дисплеев на основе активной матрицы.

LG.Philips на выставке CES 2008 впервые показала гибкий 14.3-дюймовый дисплей формата A4 разрешением 1280×800, отображением 16.7 млн. цветов и углами обзора 180°. В 2008 году инженеры Sony показали гибкий дисплей на базе органической светодиодной технологии (OLED), отображающий 16.7 миллионов цветов – габаритами 64×64 мм и разрешением всего 160×120 точек, толщиной всего 0.3 мм. Sony продемонстрировала прототипы устройств с гибкими OLED-дисплеями на выставке Ceatec Japan 2009.

Как бы то ни было, сегодня гибкие дисплеи по-прежнему находятся либо в стадии проектирования, либо на этапе создания прототипа. Это относится как к электронной бумаге, так и к устройствам на основе светодиодов. Однако, по прогнозам, уже к 2013 году ежегодный оборот этого рынка составит приблизительно 338 млн. долларов. Конечная цель развития технологий гибких дисплеев заключается в том, чтобы получить материал для изготовления легких дисплеев, которые можно свернуть в «трубочку» и которые оснащены всеми необходимыми электронными компонентами следующего поколения, в том числе процессором и памятью.

### Перспективы развития

Многие компании продолжают развивать технологии ЖК дисплеев, особенно в части перехода на LED-подсветку ЖК матриц, что существенно улучшит цветопередачу таких дисплеев. Однако, проблема с углами обзора остается нерешенной до конца. И здесь многие компании видят большие перспективы для OLED-технологий, позволяющих улучшить как цветопередачу, так и решить проблему с углами обзора. Развиваются технологии плазменных панелей и SED/FED-дисплеев. Большие перспективы у технологий гибких дисплеев, позволяющих существенно уменьшить вес и габариты таких устройств.

Компанией Sharp разработана 37-дюймовая ЖК панель стандарта HDTV с контрастом изображения 1000000:1.

На сегодняшний день компания Sony лидирует в гонке OLED телевизоров. Компании Sony удалось наладить производство панелей благодаря решению трёх основных проблем:

- формирование активной матрицы на подложке дисплея;
- нанесение слоя OLED на подложку большого размера;
- увеличение ресурса этих панелей.



Первый серийный OLED-телевизор Sony XEL-1 с диагональю 11 дюймов производится с 2007 года и уже разработан 27-дюймовый OLED-экран HDTV с контрастом 1000000:1.

Компания Samsung разработала рабочий прототип 31-дюймового OLED-дисплея. В 2009 году Samsung собирается выпустить уже 3 млн. панелей, а в 2010 – 6 млн.

Компания Toshiba Matsushita разработала OLED-телевизор с диагональю 20.8 дюйма и разрешением - 1280×768 точек.

Предполагается, что развитие технологий OLED-дисплеев позволит к 2016 году добиться снижения их стоимости до уровня ниже, чем у ЖК-дисплеев.

FED-дисплеи активно используются японскими компаниями (Canon, Sony) в такой продукции, как мобильные телефоны, экраны для видеокамер и т.д.

Уже разработан FED-дисплей с диагональю 19.2 дюйма: разрешение 1280×960 точек, яркость 400 кд на квадратный метр. Заявленные параметры: контраст- 20 000:1, шаг пикселей - 0,306 мм, частота - 240 кадров в секунду. Коммерциализация технологии FED ожидается в 2009 году с появлением целой линейки дисплеев с разрешением вплоть до Full HD (1920×1080 точек).

### **Трёхмерные дисплеи**

Развитие технологий трёхмерных (3D) дисплеев связано прежде всего с медициной и индустрией развлечений (компьютерных игр и систем виртуальной реальности). Основной особенностью таких дисплеев является возможность объёмного (трехмерного) восприятия изображения.

Можно выделить следующие типы 3D дисплеев:

1. Стереоскопические дисплеи
2. Автостереоскопические дисплеи
3. Голографические дисплеи
4. Объёмные дисплеи

Стереоскопические дисплеи формируют отдельные изображения для каждого глаза. Такой принцип используется в стереоскопах, известных с XIX века. Еще в 1838 году Ч.Уитстоун (Wheatstone) объяснил бинокулярное зрение и изобрел стереоскоп.

Для разделения изображений для левого и правого глаза в стереоскопических дисплеях используют три основных способа: анаглифический (с помощью цветных светофильтров), поляризационный (изображения разделяют по поляризации) и затворный (изображения для каждого глаза блокируются поочередно).

Анаглифический метод не позволяет получить хорошее качество цветопередачи, так как оптические цветные фильтры не имеют резкой спектральной границы пропускания.

Поляризационный способ реализации 3D-дисплея позволяет получить хорошую цветопередачу, однако он достаточно сложен, так как требуются специальные устройства отображения. Наиболее широкое применение этот метод получил в киноиндустрии (например, система кинозалов IMAX).

Затворный метод получения стереопар наиболее распространен для получения стереоэффектов на экране компьютерных мониторов. Кадры стереопары поочередно проходят к правому или левому глазу в результате синхронизации ЖК блокирующих очков с изображением на мониторе. Недостатком такого метода является снижение частоты смены кадров в два раза, поэтому следует использовать мониторы с частотой кадров не менее 120 Гц.

В случае автостереоскопического 3D-дисплея, стереоэффект достигается без использования специальных очков или шлемов. Однако, в этом случае необходимо использовать специальный растр, позволяющий разделить изображение создаваемое экраном по специальной программе на два, каждое из которых направляется в область наблюдения (отдельно для левого и правого глаза). Оптический растр представляет из себя, как правило, совокупность вертикально направленных цилиндрических линз, каждая из которых прикрывает два столбца пикселей дисплея. В настоящее время некоторые компании уже производят растровые ЖК-дисплеи. Недостатком растровых стереоскопических дисплеев является ограниченная зона наблюдения.

### Голографические дисплеи

Голографические 3D-дисплеи потенциально могут воспроизводить бесконечное количество ракурсов изображения объекта как это, например, происходит при рассматривании изображения восстановленного аналоговой голограммой. Однако, в современных информационных системах требуется проводить оцифровку изображения до нужного числа ракурсов и обеспечить ввод и вывод с последующим декодированием массива этих изображений. Прототипом цифрового голографического 3D-дисплея может служить система Mark II (рис.46), созданная в MIT (США).

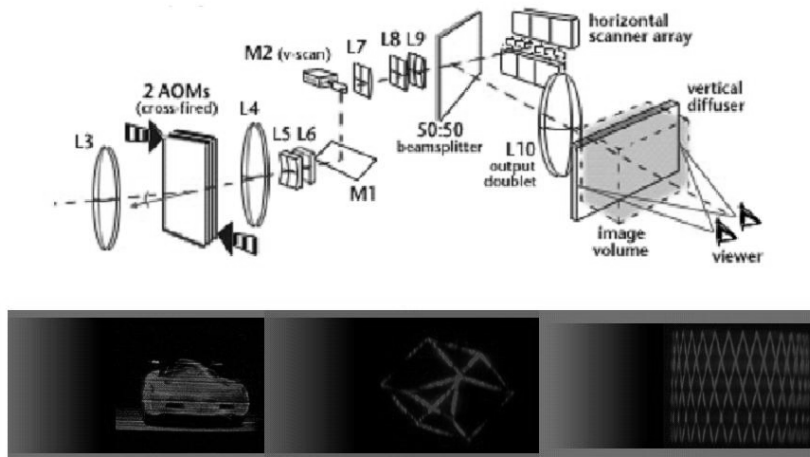


Рис.46. Лабораторный макет голографического 3D-дисплея, созданного в МИТ под руководством С. Бентона

Однако качество и размер полученных изображений пока не может конкурировать с другими объёмными системами.

Другим примером голографических 3D-дисплеев являются стационарные голографические дисплеи, объёмное изображение объекта на которых записано и не изменяется во времени. Такие дисплеи являются хорошим подспорьем для инженеров, дизайнеров, архитекторов и т.д., там, где видение трехмерной модели объекта наиболее предпочтительно, особенно в случае дороговизны ее изготовления в виде макета. Примером такого рода 3D-дисплеев могут служить дисплеи фирмы Zebra Imaging.

#### Объёмные дисплеи

Объёмные дисплеи используют различные физические механизмы для показа светящихся точек в пределах некоторого объёма. Такие дисплеи вместо пикселей оперируют вокселями. Объёмные дисплеи строятся на разных принципах. Например, они могут состоять из множества плоскостей, формирующих изображение, которые расположены одна над другой, или плоских панелей, создающих эффект объёмности за счёт своего вращения в пространстве. Пример схемы такого объёмного дисплея показан на рис.47.

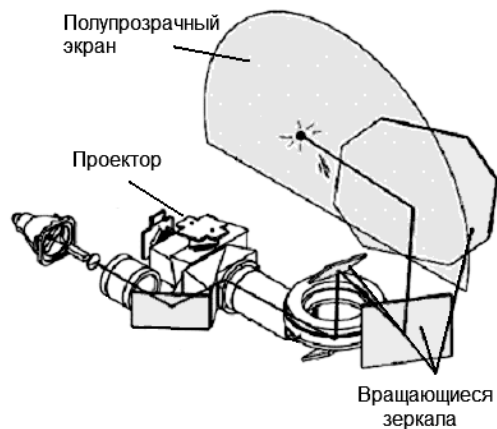


Рис.47. Структурная схема объемного 3D-дисплея Perspecta 1.9.

### Системы виртуальной реальности

Основные применения систем виртуальной реальности:

1. Тренажеры (авто, авиа, космос, морские суда и т.д.)
2. Медицина (манипуляторы в хирургии, психология)
3. Телекоммуникации
4. Компьютерные игры

Наибольшее применение такие системы находят в системах подготовки сложной в управлении техники: самолетов, космических летательных аппаратов, судов и т.д. В компьютерных играх используются как специальные шлемы для получения стереоэффекта, так и специальные перчатки, позволяющие интерактивно участвовать в игре.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

---

## ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ ФОТОНИКИ И ОПТОИНФОРМАТИКИ

Кафедра "Фотоника и оптоинформатика" была создана летом 2002 года. Одной из ее важнейших задач является организация учебного процесса и подготовка специалистов по оптоинформатике – стремительно развивающейся новой области науки и техники, в которой разрабатываются оптические технологии сверхбыстрой передачи, обработки и записи информации, создаются быстродействующие оптические компьютеры и системы искусственного интеллекта. Разработка таких оптических информационно-телекоммуникационных технологий, представляющих собой информационные технологии нового поколения, является приоритетным направлением развития российской науки, техники и технологий.

В рамках образовательного направления 200600 «Фотоника и оптоинформатика» студентам читаются лекционные курсы по оптической физике, теории информации и кодирования, архитектуре вычислительных систем, технологии программирования, цифровым оптическим вычислениям, оптическим технологиям искусственного интеллекта, голографическим системам записи информации и другим актуальным проблемам оптоинформатики, а также по квантовой информатике. Эти лекционные курсы поддерживаются эксклюзивными учебно-научными экспериментальными практикумами.

Среди научных подразделений кафедры – научно-образовательный центр фемтосекундной оптики и фемтотехнологий, лаборатория компьютерного моделирования и параллельных вычислений, проблемная лаборатория волновых процессов.

Среди студентов и аспирантов кафедры – стипендиаты Президента и Правительства Российской Федерации, победители конкурсов научных работ, проводимых Российской Академией наук, крупнейшими мировыми научными обществами, такими как INTAS (Фонд научно-исследовательских работ Европейского сообщества), SPIE (Международное общество инженеров-оптиков), CRDF (Американский фонд гражданских исследований и развития), OSA (Оптическое общество Америки).

Кафедра фотоники и оптоинформатики постоянно занимает призовые места по итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов ИТМО.