

# ТРЕХМЕРНЫЙ ДИСПЛЕЙ: ВЫБОР РЕАЛИЗУЕМЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Ежов В.А.

e-mail: [ezhov@3dstereo.ru](mailto:ezhov@3dstereo.ru)

сайт <http://3dstereo.ru>

июль 2005 г.

Статья опубликована в сокращенном виде в журнале «Кинемеханик», 2006, №№ 9-11.

На базе предложенной классификации трехмерных дисплеев выделены подклассы реализуемых и перспективных (практически ценных) технических решений, исходя из совокупности свойственным им объективных (физико-технических) факторов с учетом субъективных (психофизиологических) факторов, обусловленных фундаментальными свойствами объемного видения человека. Оценена взаимная конкурентноспособность предложенных классов технических решений по решению основных задач объемного отображения.

**Введение.** В течении многих десятилетий ведется разработка трехмерных дисплеев, однако только определенные варианты из них находят реальное применение, несмотря на большое разнообразие технических предложений и многогранность задач, в которых востребовано объемное отображение.

С целью установления принципиальных причин этой парадоксальной ситуации в данной работе предпринято следующее исследование:

- предложена классификация технических решений (далее - решений) по трехмерным дисплеям, исходя из двух критериев,
- определены *первичные* объективные и субъективные факторы для оценки реализуемости и перспективности решений,
- на основе первичных факторов определены априори нереализуемые или неперспективные подклассы решений,
- рассмотрены основные группы задач объемного отображения и предъявляемыми ими требования к решениям,
- выделен перспективный подкласс решений, отвечающий требованиям современных задач объемного отображения.

**О фундаментальных свойствах объемного видения человека.** Прежде всего следует подчеркнуть, что в зрительном аппарате человека отсутствует прямой *трехкоординатный* анализатор объемных визуальных образов, т.е. такой зрительный анализатор, который исследовал бы предъявляемый образ трехмерной сцены напрямую по трем пространственным координатам. Объемное изображение любой сцены всегда воспринимается зрением человека только посредством формирования промежуточных *двумерных* проекций (ракурсов) сцены, которые далее анализируются (обрабатываются) сознанием человека для получения полноценного восприятия им объема сцены. Иначе говоря, объемное видение человека основано на *бинокулярном (стереоскопическом)* зрении, когда зрительным аппаратом анализируются различия в двумерной структуре двух моноскопических изображений сцены (сформированных на сетчатках двух глаз посредством хрусталиков-объективов) с последующим восстановлением объема сцены в виртуальном виде (в сознании человека).

При этом максимальная *реалистичность восприятия* человеком сцен реального мира обеспечивается за счет дополнительных факторов зрения (см. раздел 2.2). Отсутствие использования этих факторов при наблюдении *опосредованных* (формируемых трехмерными дисплеями) визуальных образов существенно не ухудшает восприятие человеком объема (за которое «ответственно» в основном бинокулярное зрение), а только снижает реалистичность восприятия (снижает эффект присутствия наблюдателя в наблюдаемой сцене). Однако для ряда задач именно реалистичность восприятия является доминантой, где и необходимо по возможности учитывать все факторы зрения.

*Комфортность восприятия* образа трехмерной сцены соответствует естественности работы зрительного аппарата наблюдателя. Наивысшая комфортность соответствует созданию таких условий наблюдения опосредованных визуальных образов, которые максимально приближены к условиям естественного (прямого) восприятия человеком сцен (картин) реального мира. Рассогласование каких-либо характеристик зрительного аппарата человека при наблюдении опосредованных визуальных образов может привести к неадекватному восприятию образов и к повышенной утомляемости зрения.

## 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ БАЗОВЫХ КЛАССОВ И ПОДКЛАССОВ ТРЕХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЕВ

В качестве первого критерия классификации выберем *характер представления* исходной трехмерной сцены в визуальном образе, предъявляемом наблюдателю (в образе, формируемом дисплеем в его рабочей среде, рабочем пространстве). В результате получим два класса дисплеев:

- с *объектным* представлением или образом (сцены), когда предъявляется визуальный образ собственно объектов сцены, т.е. исходное световое распределение, присущее разрешимым точкам самих объектов,
- с *дифракционным* представлением или образом сцены (*спектрально-угловым* представлением или представлением френелевской *дифракцией*), когда предъявляется дифракционное световое распределение, существующее в некоторой плоскости пространства, расположенной на некотором расстоянии, вплоть до бесконечности, от объектов сцены.

Математически дифракционное представление в произвольной плоскости описывается известным дифракционным интегралом Френеля-Кирхгофа, который с позиции теории информации (пространственной обработки сигналов) содержит функцию искомого изображения (его светового распределения) не напрямую, как это имеет место в плоскости изображения, а в виде математической операции интегральной свертки функции указанного светового распределения с функцией отклика свободного пространства на импульсное воздействие. Импульсное воздействие в данном случае по сути соответствует световой точке; результатом ее воздействия на свободное пространство является распространяющаяся в его пределах сферическая волна. Математически импульсный отклик пространства (в данном случае сферическая волна) описывается элементарной комплексной экспоненциальной функцией. Роль линзы (хрусталика глаза) состоит в выполнении математической операции, обратной операции свертки (см., например, [1], с.7), именно поэтому обеспечивается успешное наблюдение человеком изображения через восприятие дифракционного образа.

(Приведенное здесь уточнение понятие дифракционного представления или образа необходимо иметь в виду для того, чтобы впредь избегать путаницы в терминологии при определении истинного характера предъявляемого каким-либо трехмерным дисплеем конкретного образа, например, отличать голографический метод, обеспечивающий корректное формирование вышеуказанного дифракционного образа, от негологографического дифракционного метода формирования объектного образа, который иногда ошибочно трактуется исследователями как голографический – см. раздел 7.2).

В качестве второго критерия выбрана *размерность* (число пространственных степеней свободы) предъявляемого дисплеем образа исходной сцены. В результате каждый из указанных двух базовых классов разделится на два подкласса, один из которых характеризуется трехкоординатным предъявляемым образом, другой подкласс - *двухкоординатным*.

Практически все известные технические решения по трехмерным дисплеям попадают в указанные базовые классы.

Термин «техническое решение» понимается в патентоведческом смысле, т.е. техническое решение (устройство или способ) должно удовлетворять условию единства изобретения. Произвольный известный трехмерный дисплей может сочетать в себе линейную ком-

бинацию несколько технических решений (изобретений) в указанном смысле, каждое из которых неизбежно попадет в один из базовых подклассов.

## 1.1. КЛАСС ТРЕХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЕВ НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТНОГО ОБРАЗА

### 1.1.1. ПОДКЛАСС С ТРЕХКООРДИНАТНЫМ ОБЪЕКТНЫМ ОБРАЗОМ

*Техническая сущность* – образ собственно объектов сцены развернут в трехкоординатной среде (пространстве)  
**Альтернативное техническое наименование подкласса: дисплеи с трехкоординатной разверткой информационного сигнала (сюда входят все дисплеи с т.н. «объемной метрикой» - volumetric displays)**

В дисплеях данного подкласса пространственное расположение каждой разрешимой точки (пространственного отсчета) предъявляемого образа соответствует (с выбранным масштабом) пространственному расположению соответствующей разрешимой точки (или некоторой группы точек) исходной сцены. Поскольку пока невозможно технически реализовать предъявление всех разрешимых точек динамического трехмерного оптического образа *параллельно (одновременно)* во всех соответствующих точках трехмерного пространства, то предлагаются технические решения с *последовательной* трехкоординатной разверткой образа, чаще всего с «последним» воспроизведением последнего (рис.1), слитное объемное восприятие которого во времени наблюдателем W обеспечивается за счет кратковременной (оперативной) памяти его зрительного аппарата. Геометрия и физическое содержание указанных «слоев» могут быть самыми различными. В одних вариантах («твердотельные» дисплеи) пространство трехкоординатной развертки заполнено множеством взаимно параллельно расположенных (вдоль координаты оси Z) планарных «слоев» (рис.1,а) некоторого вещества (рабочей среды T), которые электрически и/или оптически адресуются последовательно во времени с помощью сканирующего (проеекционного) устройства с источником S информации, в дру-

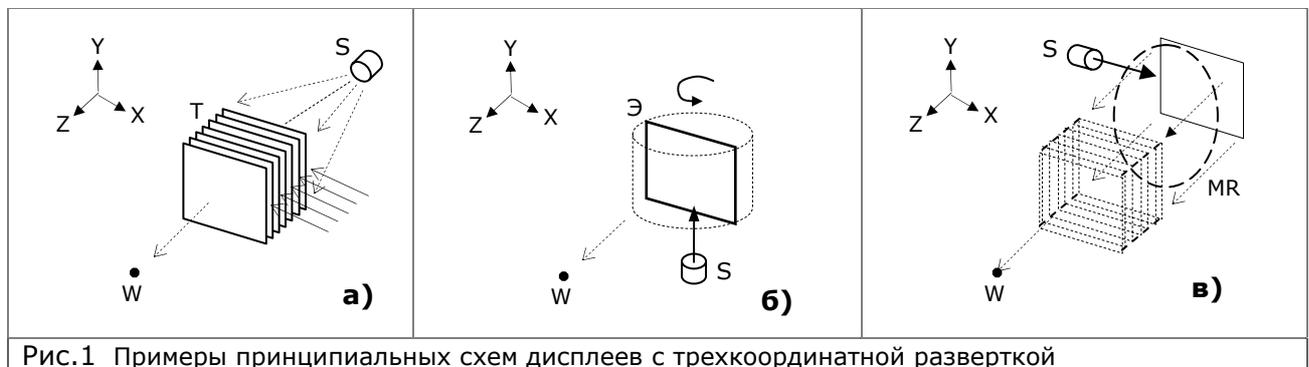


Рис.1 Примеры принципиальных схем дисплеев с трехкоординатной разверткой

гих вариантах дисплеев трехкоординатная развертка осуществляется вращением одного и того же планарного «слоя» - экрана Э (рис.1,б) при его последовательной во времени адресации, в третьих вариантах трехкоординатная развертка осуществляется в пространстве, не содержащем твердого вещества, в частности, образ может развертываться в виде *последовательного действительного* трехмерного изображения, «висящего» в воздухе или вообще в вакууме, при этом ввод информации с источника S осуществляется с использованием неподвижной двумерной рабочей среды, а переход от одного слоя к другому (вдоль координаты Z) осуществляется изменением фокусного расстояния сферического зеркала MR (рис.1,в).

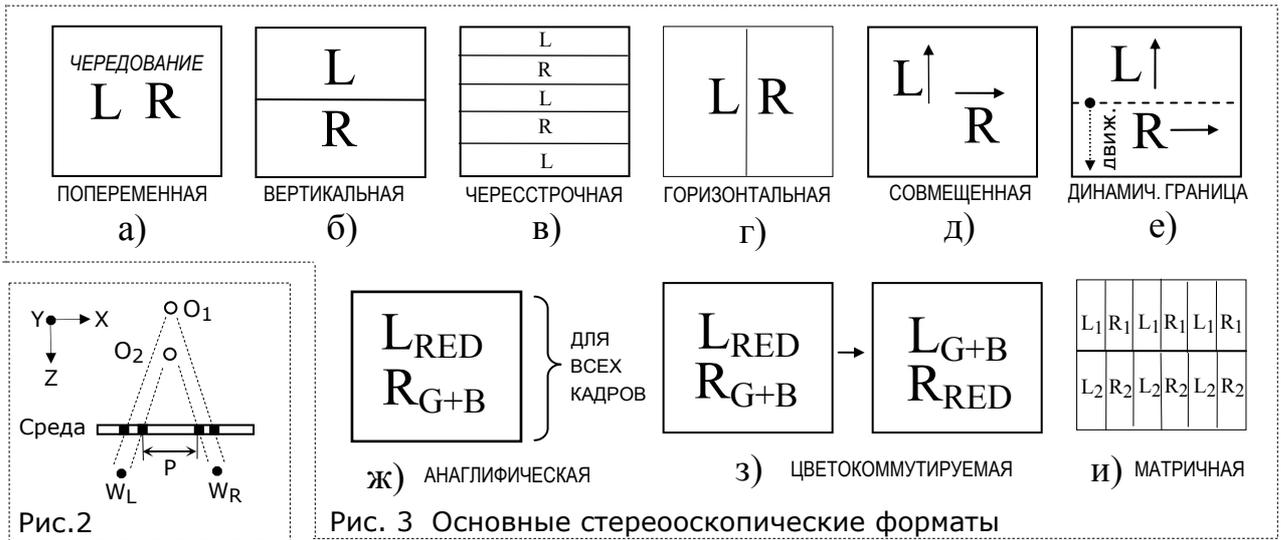
Многообразие подобных технических предложений образуется в основном за счет варьирования способов адресации рабочей среды (пространства трехкоординатной развертки) и за счет перебора всевозможных веществ в качестве рабочей среды.

### 1.1.2. ПОДКЛАСС С ДВУХКООРДИНАТНЫМ ОБЪЕКТНЫМ ОБРАЗОМ

*Техническая сущность* – образ собственно объектов сцены представлен двумерными проекциями (стереопарами)  
**Альтернативное техническое наименование подкласса: дисплеи с двухкоординатной разверткой информационного сигнала (сюда входят все стереоскопические дисплеи - stereoscopic displays)**

Образ трехмерной исходной сцены представлен в виде плоских проекций, называемых ракурсами (views) сцены. Различают левый L и правый R ракурсы, одновременно предъявляемые соответственно левому  $W_L$  и правому  $W_R$  глазам наблюдателя (рис. 2) с целью получения объемного изображения, например, двух объектов в виде точек  $O_1$  и  $O_2$  – для каждой по двум проекциям. Глубина кажущегося расположения указанных объектов (вдоль оси Z) определяется расстоянием P (параллаксом) между одинаковыми фрагментами левой и правой проекций заданного объекта на плоскости (вдоль оси X).

**Стереоскопические форматы (форматы представления ракурсов).** Стереоскопический формат – способ совместного представления двух ракурсов отображаемой сцены (стереопар) на плоскости экрана дисплея. Основные



стереоскопические форматы иллюстрируются рис.3 : *попеременная* стереопара ПС (рис.2,а), *вертикальная* стереопара ВС (рис.2,б), *чересстрочная* стереопара ИС (рис.2,в), *горизонтальная* стереопара ГС (рис.2,г), *совмещенная* стереопара АС (рис.2,д), стереопара с *динамической (движущейся) границей* ДГС ((рис.2,е), *анаглифическая* стереопара АС (рис.2,ж), *цветокоммутируемая* стереопара ЦС (рис.2,з), *матричная* стереопара МС (рис.2,и).

Большинство форматов (отмечены курсивом) получило адекватное их смыслу определение на русском языке впервые в этом тексте. Широко распространенные англоязычные определения форматов приведены в [2], но они являются, как правило, устаревшими по смысловому содержанию, и поэтому нецелесообразен прямой перевод этих терминов с английского языка.

Многообразие указанных форматов связано со стремлением обеспечить максимальную гибкость объемного отображения.

Основная черта данного подкласса – наивысшая степень совместимости с двумерными (моноскопическими) дисплеями по выходу (способу представления информации) и по входу (источнику сигнала). Достаточно пары двумерных проекций для наблюдения сцены любой глубины и с расположением ее объектов на любом расстоянии от наблюдателя. Ограничения на глубину отображаемой сцены и на величину минимального расстояния от ее объектов до наблюдателя накладываются только стремлением минимизировать (не допустить) утомляемости зрения.

### 1.2. КЛАСС ТРЕХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЕВ С ДИФРАКЦИОННЫМ ОБРАЗОМ

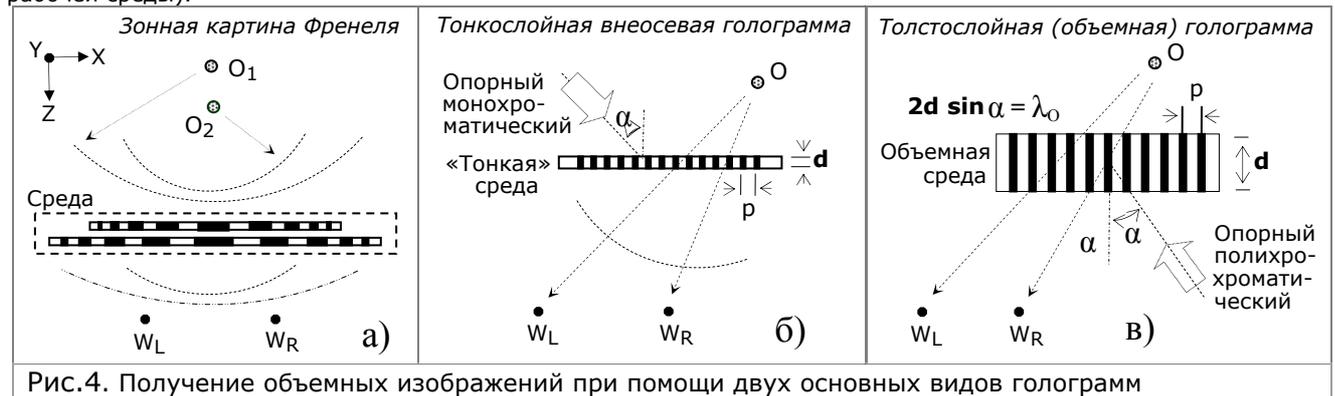
*Техническая сущность – образ представлен двухкоординатной или трехкоординатной дифракционной картиной*  
**Альтернативное техническое наименование класса: спектрально-угловые дисплеи (реализуются посредством записи-воспроизведения динамических голограмм)**

Дифракционный образ в виде оптической волны, идущей от сцены, можно записать в веществе рабочей среды дисплея только в виде интерференционной картины, т.е. только в виде суммы (точнее, квадрата модуля суммы) мгновенной амплитуды оптической волны от сцены и мгновенной амплитуды когерентной с ней опорной волны.

Непосредственная запись в любом веществе мгновенной амплитуды оптической волны (без применения опорной волны) не представляется физически возможной в силу крайне высокой несущей частоты оптической волны и отсутствия веществ с адекватным быстроедействием. Взаимная когерентность двух волн практически есть постоянство разности фаз мгновенных амплитуд этих волн во всех точках рассматриваемого пространства, что позволяет «вычлесть» оптическую несущую из записи.

Применение опорной волны, суммируемой с когерентной с оптической волной от сцены (которую обычно называют предметной волной), позволяет получить стационарную интерференционную картину, структура которой (видность и форма интерференционных полос) и есть запись предметной волны (дифракционного образа сцены), которую назвали *голографической для* отражения полноты сохранения информации (*holos - полная* в переводе с греческого).

В результате каждой из элементарных точек сцены отвечает зонная картина Френеля (рис. 4,а), представляющая в интерференционном виде элементарную сферическую оптическую волну с кривизной и с углом наклона волнового фронта, отражающими пространственное расположение соответствующих точек  $O_1$  и  $O_2$  сцены (с целью наглядности иллюстрации зонные пластинки условно показаны разнесенными в пространстве, на самом деле они записываются в среде интегрально со взаимным наложением, однако тем не менее действуют на свет независимо друг от друга, подчиняясь принципу линейной суперпозиции, если запись осуществляется на линейном участке передаточной функции рабочей среды).



На практике взаимно когерентные предметную и опорную волны с достаточным (для голографической записи) размахом амплитуды можно получить только с применением монохроматических (лазерных) источников света; ис-

пользование для записи нелазерных, широкополосных источников света (источников белого света) не представляется возможным.

В левом  $W_L$  и правом  $W_R$  окнах наблюдения (в которых расположены глаза наблюдателя) осуществляются выборки волнового фронта, идущего с голограммы при ее восстановлении (воспроизведении).

Существует два типа голограмм, в соответствии с которыми можно говорить о двух подклассах рассматриваемых дисплеев.

### 1.2.1. Подкласс с двухкоординатным дифракционным образом

*Техническая реализация на современном этапе развития техники - образ записан в структуре интерференционных полос двумерной (тонкослойной) динамической голограммы*

**Техническое наименование субкласса с голографической записью: дисплей с динамической тонкослойной голограммой**

«Тонкослойность» голограммы означает сравнимость толщины  $d$  (рис.4,б) слоя рабочей среды со средним периодом  $p$  зарегистрированных интерференционных полос. Минимальная величина периода  $p$  равна половине средней длины волны света  $\lambda$  (которая для видимого света попадает в диапазон 0,4-0,6 мкм). В этом случае запись последних образует обычную (двумерную) дифракционную решетку, которая характеризуется хроматической дисперсией и наличием двойной системы дифракционных порядков (расположенных симметрично относительно перпендикуляра плоскости решетки).

При записи тонкослойной голограммы необходимо создать достаточно большой угол между направлениями пространства предметной и опорной волн (применить схему записи с внеосевым опорным пучком, называемой схемой Лейта - Упатниекса), чтобы при восстановлении голограммы (подачей опорного пучка под тем же углом  $\alpha$  - рис.4,б, под которым он подавался при записи объекта  $O$ ) обеспечить достаточный пространственный разнос между истинным и «ложным» восстановленными образами (два образа возникают вследствие указанной симметрии системы дифракционных порядков в тонкослойной дифракционной решетке). Угол между предметным и опорным пучком должен быть не меньше, чем наивысшая пространственная частота в угловом спектре частот изображения сцены. Это приводит к тому, что вся интерференционная картина оказывается пространственно промодулирована несущей частотой с периодом, который должен быть меньше самого малого периода среди всех записанных зонных картин Френеля. Из этого следует, что для записи таких голограмм нужна рабочая среда с существенно большим пространственным разрешением (по крайней мере на порядок), чем это потребовалось бы при записи осевой голограммы (голограммы Габора), которая практически не применяется в устройствах отображения из-за практической невозможности раздельно наблюдать ложный и истинный восстанавливаемые образы (из-за взаимного наложения последних).

### 1.2.2. Подкласс с трехкоординатным дифракционным образом

*Техническая реализация на современном этапе развития техники - образ сформирован в объемной (толстослойной) динамической голограмме*

**Техническое наименование субкласса с голографической записью: дисплей с динамической объемной голограммой**

Объемные или толстослойные голограммы (голограммы Денисюка) характеризуются толщиной  $d$  слоя рабочей среды на один - два порядка большей максимального периода  $p$  зарегистрированных интерференционных полос ( $d \sim 30-100$  мкм при среднем  $p \sim 0,2-0,3$  мкм). В этом случае зарегистрированные интерференционные полосы фактически образуют решетки Брэгга, которые характеризуются взаимосвязанными спектральной и угловой селективностью (рис. 4,в). Спектральная селективность означает, что при освещении толстослойной голограммы широкополосным источником света (источником белого света) она сама выделит требуемую длину  $\lambda_0$  волны света для заданного угла  $\alpha$  наблюдения в восстановленной предметной волне. Это означает, что для восстановления толстослойной голограммы можно использовать обычные источники белого света.

Угловая селективность означает, что образуется только истинный восстановленный образ, а ложный образ практически подавлен (дифракционные порядки в такой голограмме образуются только с одной стороны от ее оси).

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ФАКТОРОВ, АПРИОРНО ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ РЕАЛИЗУЕМОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ БАЗОВЫХ КЛАССОВ ТРЕХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЕВ

Одна группа первичных факторов присуща собственно техническим решениям (их классам или подклассам), из них основными являются следующие физико-технические факторы: *критическое ограничение, параметры рабочей среды, параметры источника информационного сигнала.*

Другая группа первичных факторов – психофизиологические особенности зрительного восприятия трехмерных образов человеком. Поскольку выходное изображение трехмерного дисплея всегда воспринимается напрямую человеческим зрением, то грамотная оценка практической ценности трехмерных дисплеев невозможна без учета фундаментальных свойств объемного видения человека.

### 2.1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ПРИСУЩИЕ СОБСТВЕННО ТЕХНИЧЕСКИМ РЕШЕНИЯМ

**Критическое ограничение решения (класса, подкласса).** Определим *критическое ограничение* технических решений как такое принципиальное физико-техническое ограничение, которое самостоятельно диктует практическую ценность (реализуемость и перспективность) некоторой группы (класса) предложений (решений) *вне зависимости от теоретических достоинств последних.*

Скажем, критическим ограничением такого класса предложений, как «вечный двигатель», является невозможность на современном уровне развития техники практической реализации 100%-ного к. п. д., что ведет к нулевой практической ценности таких предложений независимо от чисто теоретических (гипотетических) достоинств такого «двигателя» по всем остальным техническим параметрам.

Наличие критического ограничения не является обязательным для произвольного класса (подкласса), но если такое ограничение существует, то совершенно необходимо его выявить, если целью является построение практически конкурентноспособного трехмерного дисплея.

**Требуемые параметры рабочей среды.** Без участия рабочей среды невозможно реализовать никакой из дисплеев. *Рабочей средой* трехмерного дисплея является динамическая реверсивная среда, в пространстве (в веществе) которой осуществляется физическая запись и воспроизведение образа трехмерной сцены. Практическую реализуемость подклассов трехмерных дисплеев в первую очередь следует оценивать по возможности физической реали-

зации рабочей среды с требуемым разрешением, быстродействием, оптической эффективностью, контрастом и размерностью.

Например, игнорирование отсутствия адекватной рабочей среды (скоростных высокоразрешающих пространственно-временных оптических модуляторов с электрическим или оптическим входом) явилось одной из основных причин полного провала попытки построения оптических вычислительных комплексов в 80 – х годах прошлого века в исследовательских группах всего мира (несмотря на разработку массы математических алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов). Только в области (когерентно)оптической обработки радиосигналов (сигналов с ВЧ и СВЧ несущей) были реализованы практические оптические корреляторы и спектроанализаторы, конкурентноспособные с аналогичными электронными устройствами, во многом благодаря наличию таких быстродействующих и высокоточных устройств ввода радиосигналов, как акустооптические модуляторы (АОМ) [3].

**Требуемые параметры источника информационного сигнала.** Нельзя реализовать в полной мере потенциальные возможности дисплея без наличия соответствующего источника информационного сигнала. Для трехмерных дисплеев невозможность практической реализации адекватных им источников сигнала в некоторой сфере применения, естественно, станет непреодолимым препятствием к их применению в данной сфере. Первостепенное значение имеет реализуемость датчика требуемой размерности. Например, для объемного отображения сцен реального мира не обойтись без двухкоординатного или трехкоординатного датчика (в зависимости от принципа работы дисплея – с двухкоординатной или трехкоординатной разверткой). Также необходимо оценивать величину требуемой пропускной способности (информационный поток в бит/сек) для линии связи датчика с дисплеем.

## 2.2. ОСОБЕННОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ОБРАЗОВ ЧЕЛОВЕКОМ

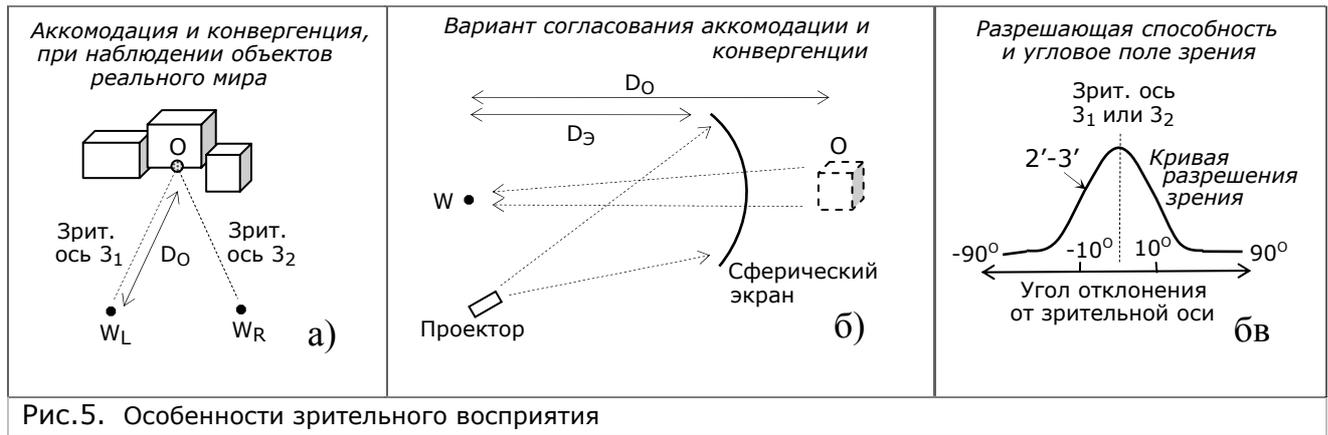


Рис.5. Особенности зрительного восприятия

От трехмерных дисплеев в общем случае требуется воспроизводить такие объемные изображения, при восприятии которых зрение человека будет функционировать столь же естественно и комфортно, как и при наблюдении привычных объектов реального мира. Проиллюстрируем, как зрение человека воспринимает объекты реального мира (рис. 5) и кратко рассмотрим основные психофизиологические особенности их восприятия.

**Бинокулярный параллакс как основной параметр объемного отображения.** Соответствует величине горизонтального сдвига (длине отрезка P на рис.2) для соответствующих точек двух ракурсов, составляющих стереопару. Именно этот анализируемый зрением человека сдвиг (бинокулярный параллакс) несет в себе основную информацию о расположении по глубине сцены всех ее объектов, состоящих из указанных точек. Бинокулярный параллакс является информационной основой бинокулярного зрения, которое, в свою очередь, является основой восприятия объема человеком при наблюдении изображений от трехмерных дисплеев всех классов.

**Согласованность зрительной аккомодации и конвергенции.** Аккомодация - способность глаз фокусироваться на любой точке воспринимаемого объекта (точке O на рис. 5,а) в соответствии с ее расстоянием  $D_0$  от окон наблюдения  $W_L, W_R$  (левого и правого глаз). Аккомодация осуществляется за счет соответствующего изменения кривизны поверхности хрусталиков глаза, осуществляемого глазными мышцами. Конвергенция – способность глаз изменять направления зрительных осей ( $Z_1$  и  $Z_2$  на рис. 5,а) так, чтобы последние пересекались в наблюдаемой точке O объекта. При наблюдении объектов реального мира аккомодация и конвергенция всегда согласованы между собой, т.е. для любой наблюдаемой точки O глаза сфокусированы на ней, а зрительные оси глаз также пересекаются в этой точке.

При наблюдении опосредованных (формируемых дисплеями) трехмерных изображений это условие часто нарушается, особенно в простых стереоскопических дисплеях. Действительно, при рассмотрении двух плоских проекций (ракурсов), воспроизводимых в плоскости рабочей среды (рис.2,а) аккомодация зрения (фокусировка глаз) осуществляется на плоскости экрана дисплея. В то же время для восприятия объемного изображения любой точки O конвергенция зрения (пересечение зрительных осей глаз) должна осуществляться в той точке пространства, где расположено кажущееся изображение указанной точки. В результате такого рассогласования между аккомодацией и конвергенцией глаз возникает дискомфорт в работе зрительного аппарата, приводящий к повышенной утомляемости зрения.

Однако указанное рассогласование не является непременным спутником любых стереоскопических систем. Улучшить согласование аккомодации и конвергенции можно в простейшем случае существенным удалением экрана от наблюдателя либо оптическим «удалением» экрана, например, с использованием неплоского (сферического) экрана (рис.5,б), который работает в качестве фокусирующего элемента и отдаляет наблюдаемый объект O (наподобие зонной картины Френеля в голограмме, которая не дает глазу фокусироваться на поверхности самой поверхности голограммы). При этом это не означает, что все объекты отображаемой сцены будут отображаться в бесконечности, они будут отображаться во всем пространстве в соответствии с параллаксами между левым и правым ракурсами. Пути устранения указанного рассогласования есть одно из основных направлений развития стереоскопических систем.

Для случая дисплеев с трехкоординатной разверткой аккомодация и конвергенция всегда согласованы между собой, что и является основной теоретической мотивацией к разработке данного класса дисплеев.

При наблюдении изображений, восстановленных с голограмм, также всегда выполняется условие согласования аккомодации и конвергенции, поскольку глаза не фокусируются на поверхности самой голограммы вследствие того, что голографическая запись состоит из зонных картин Френеля, характеризующиеся фокусирующими свойствами, и глаза не могут аккомодироваться на плоскости таких оптических элементов, как они не могут аккомодироваться на стеклянных линзах.

**Панорамный обзор (периферийное зрение).** Даже если наблюдатель смотрит постоянно в одном направлении, он все равно воспринимает окружающие объекты в пределах углового поля размерами до  $\pm 90^\circ$  относительно направления зрительной оси глаза (т.е. восприятие осуществляется постоянно в суммарном угловом поле зрения  $180^\circ$ ). Однако при этом наивысшая разрешающая способность зрения (две – три угловых минуты,  $2'-3'$ ) существует только в достаточно узком угловом поле  $\pm 10^\circ$  относительно зрительной оси (рис. 4,в). Поэтому для построения панорамных дисплеев можно формировать изображение с высоким разрешением не по всему угловому полю восприятия, а только в направлении взора наблюдателя (складывающегося из направления поворота головы и направления поворота глаз), а в периферийной части изображения достаточно формировать лишь фоновое изображение с низким разрешением.

В стереоскопических дисплеях можно реализовать панорамное объемное изображение с любыми углами за счет стыковки границ парциальных изображений с обычными угловыми характеристиками, оставаясь при этом в разумных пределах стоимости и габаритов дисплея.

В дисплеях с трехкоординатной разверткой на практике практически невозможно получать панорамные изображения за счет стыковки дисплеев, а делать единый панорамный дисплей данного класса априори технически и экономически нецелесообразно.

В голографических дисплеях возможно применение состыкованных изображений с ряда голограмм.

**Полиракурсное восприятие.** При наблюдении объектов реального мира, если наблюдатель передвигается из стороны в сторону, он видит разные ракурсы сцены, которые меняются непрерывно (плавно), т.е. осуществляется непрерывно-полиракурсное восприятие объектов.

В стереоскопических дисплеях полиракурсное отображение реализуется методом пространственного мультиплексирования ракурсов.

В дисплеях с трехкоординатной разверткой полиракурсное отображение произвольной объемной сцены невозможно (см. раздел 3.1) без применения метода пространственного мультиплексирования, который здесь ведет к крайне громоздкой системе, причем этот метод можно реализовать здесь только для случая единственного наблюдателя.

В голографических дисплеях в принципе интегрально реализуется непрерывно-полиракурсное восприятие, поскольку одновременно представлен весь угловой спектр ракурсов в единой голограмме (в пределах ее угловой апертуры).

**Эффект оглядывания (саккады - saccads).** Глаз человека постоянно совершает произвольные скачкообразные угловые движения (саккадические движения), которые позволяют, в частности, осуществить оглядывание наблюдаемого объекта даже при полностью неподвижной голове наблюдателя. Функционированием этого эффекта оглядывания некоторые исследователи склонны объяснять наличие «живости» восприятия объектов реального мира.

В стереоскопических дисплеях эффект оглядывания реализовать сложно. Именно отсутствием этого эффекта некоторые исследователи объясняют некоторую «сухость» («картонность») наблюдаемых сцен. Однако при необходимости этот эффект может быть реализован в стереоскопических дисплеях с использованием устройств слежения за положением глаз (такие устройства слежения сейчас не являются экзотикой, а реально реализованы даже в некоторых бытовых видеокамерах) и соответствующей тонкой «подстройкой» структуры наблюдаемых ракурсов.

В голографических дисплеях эффект оглядывания присутствует естественным образом, поскольку в голограмме записаны все ракурсы сцены, включая последние с минимальными отклонениями по углу восприятия.

В дисплеях с трехкоординатной разверткой эффект оглядывания теоретически присутствует, однако практически при наблюдении трехмерного изображения произвольного вида из-за наличия строгой угловой селективности эффект оглядывания станет некорректным (см. раздел 3.1).

**Другие психофизиологические факторы.** В целом восприятие человеком глубины сцен носит очень сложный характер и включает в себя множество дополнительных (к вышеприведенным) зрительных факторов. Полный их учет не является необходимым для традиционного подхода к построению трехмерных дисплеев в общем случае, поскольку эти факторы не являются спецификой собственно объемного зрения, а лишь косвенно способствуют ему.

Иногда строят простейшие оптические устройства, максимально «эксплуатирующие» какие-либо отдельные факторы зрения, создающие иллюзию объемного восприятия, например: • эффект Пульфрича (Pulfrich), • цветовое расслоение объектов (chromostereopsis). Поскольку получаемый здесь эффект объемности может иметь мало общего с истинной объемной структурой наблюдаемой сцены, то такие устройства нельзя классифицировать как трехмерные дисплеи, поскольку они предназначены не для документального отображения, а являются скорее визуальными аттракционами.

### 3. СОПОСТАВЛЕНИЕ БАЗОВЫХ КЛАССОВ (ПОДКЛАССОВ) ТРЕХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЕВ, ИСХОДЯ ИЗ ПЕРВИЧНЫХ ФАКТОРОВ РЕАЛИЗУЕМОСТИ И ПЕРСПЕКТИВНОСТИ

#### 3.1. ПОДКЛАСС «ОБЪКТНО-ТРЕХКООРДИНАТНЫЕ ДИСПЛЕИ» (включают в себя все VOLUMETRIC DISPLAYS) *Физико-технический признак подкласса – трехмерный объектный образ*

**Критическое ограничение подкласса - острая угловая селективность образа.** Все дисплеи данного подкласса способны корректно формировать образ только в одном, заранее определенном направлении наблюдения (корректно формируется только единственный, заранее заданный ракурс в предъявляемом наблюдателю произвольном образе). Приведем краткое доказательство факта угловой селективности с позиций геометрической оптики.

Рассмотрим простейший трехмерный предметный образ, состоящий из светящейся точки **S** и непрозрачного прямоугольника **P** (рис.6). Наблюдатель  $W_1$  со своего углового положения должен видеть как точку **S**, так и прямоугольник **P**, а наблюдатель  $W_2$  – только прямоугольник **P** (из-за блокирования прямоугольником света от точки). Ясно, что одна и та же оптическая среда принципиально не может одновременно сформировать два таких разных объемных изображения (точку с прямоугольником для наблюдателя  $W_1$  одновременно с прямоугольником без точки для наблюдателя  $W_2$ ), а может формировать только одно из этих изображений. Поэтому здесь требуется сначала задать угловое положение единственного наблюдателя, и только потом можно сформировать соответствующий единственный ракурс пространственного образа.

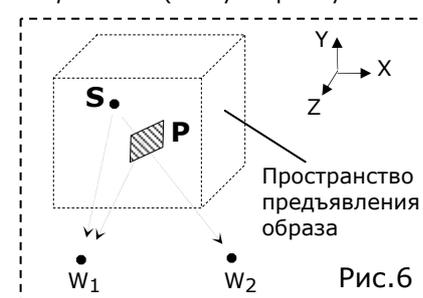


Рис.6

В сценах реального мира близкие (к наблюдателю) объекты заслоняют (частично или полностью) дальние вследствие оптических свойств вещества, из которого они состоят. В визуальном образе, поскольку все его объекты одинаково прозрачны, требуемое «загораживание» должна осуществлять программа-источник сигнала, имитируя оптические свойства вещества. Но программа не может осуществлять «загораживание» сразу по всем возможным направлениям наблюдения, ей требуется информация о конкретном угле наблюдения, т. е. о положении наблюдателя, откуда автоматически вытекает угловая селективность предъявляемого визуального образа.

Поэтому предъявляемый образ здесь нельзя наблюдать с разных сторон –

фиксированное направление наблюдения должно быть задано заранее. Во все иных направлениях наблюдаемый произвольный образ (состоящий, например, из сплошных объектов, в том числе прозрачных и полупрозрачных) предъясняется некорректно - без соблюдения требуемого перекрытия (occlusion) частей одних объектов сцены частями других (задние объекты «просвечивают» сквозь передние).

Единственное исключение – корректно предъясняются для любого направления наблюдения только каркасные («проволочные») модели-образы, состоящие исключительно из точечных источников света и исчезающе тонких световых линий, для которых не требуется осуществлять указанное «затенение».

**Дискретность по координате Z.** Поскольку имеет место прямая дискретизация отображаемого объекта по всем трем координатам, то для корректного отображения произвольных сцен нужно иметь форму рабочей среды типа куба или другой равноугонной геометрической фигуры при одинаково мелком шаге пикселей по всем трем координатам. В противном случае (при малом числе пикселей по координате Z) для корректного («неизломанного») отображения надо соответственно «сжимать» рабочую среду по указанной координате, что резко сужает функциональные возможности рассматриваемого дисплея, либо (если все же сохранить глубину отображаемого пространства по координате Z), будет наблюдаться сильная «изломанность» линий объектов, что особенно губительно именно для объектов каркасного типа – единственно варианта изображения, который мог бы корректно отображаться такими дисплеями.

**Проблема с многоаккурностью (с «обходом» вокруг изображения наблюдателями).** Многоаккурности в случае единственного наблюдателя здесь не достичь без обратной связи на вход дисплея, дающей информацию в дисплей о положении наблюдателя. Но наличие такой обратной связи вообще лишено смысла в случае двух или нескольких наблюдателей, поскольку корректный произвольный образ можно сформировать только в одном направлении (в направлении только одного из наблюдателей). Это означает, что два (и более наблюдателей), находящиеся в разных положениях, не смогут в принципе (с обратной связью или без) одновременно корректно воспринимать один и тот же произвольный образ, генерируемый дисплеями данного подкласса.

**Требуемые параметры рабочей среды.** Предъявляются очень высокие требования к быстродействию двумерной рабочей среды, применяемой для формирования «слоев» объектного образа. Кадровая частота работы такой среды должна в M раз превышать кадровую частоту работы среды в дисплее с двумерными проекциями (где M – число указанных «слоев»). Это накладывает существенное ограничение на число реальных «слоев», которое можно использовать.

**Требуемые параметры источника информационного сигнала.** Поскольку объектный образ представлен M слоями, то необходим датчик информационного сигнала, генерирующий парциальные сигналы всех M слоев. В случае съема информации о сценах реального мира пока даже трудно представить, как построить требуемый трехкоординатный датчик, обеспечивающий «последовательный» съем информации о произвольной реальной сцене, которая может иметь большую протяженность.

Отсюда ясно, что бесполезно пытаться использовать дисплеи указанного класса для отображения сцен реального мира вследствие крайней сложности (если не сказать о практической невозможности) построения соответствующего трехкоординатного датчика съема информации.

На практике можно реализовать только соответствующий датчик компьютерно-синтезированных сцен для таких дисплеев.

**Учет психофизиологических факторов восприятия.** В силу острой угловой селективности образа невозможно реализовать *полиаккурное восприятие*. Можно воспринимать только один ракурс произвольного образа, а любые изменения положения головы (или позиции наблюдателя в целом) приведут к вышеуказанному неадекватному восприятию образа.

Практически невозможно обеспечить *панорамность* восприятия, поскольку для данного подкласса образ сцены всегда сосредоточен целиком внутри пространства рабочей среды дисплея (внутри пространства предъяснения образа), а указанное пространство не может быть на практике больше, чем, например, куб с гранью размером около 17 дюймов, что ограничивает угол зрения.

Из всех факторов, способствующих повышению реалистичности восприятия сцен, только эффект *оглядывания* иногда может реализовываться успешно для определенных сцен, поскольку изменения угла наблюдения при саккадах («скачках») глаз настолько малы, что могут не выходить за пределы, накладываемые имеющейся угловой селективностью в наблюдаемом трехмерном оптическом образе, хотя теоретически и эффект оглядывания здесь теоретически некорректен для произвольного образа.

При наблюдении объектного трехмерного образа здесь принципиально отсутствует *рассогласование* между аккомодацией и конвергенцией зрения (как и при наблюдении объектов реального мира), поэтому по данной причине здесь нет предпосылок к возникновению утомляемости зрения.

### 3.2. ПОДКЛАСС «ОБЪЕКТНО-ДВУХКООРДИНАТНЫЕ ДИСПЛЕИ»

*Физико-технический признак подкласса – образ представлен двумерными проекциями сцены*

**Критические ограничения подкласса отсутствуют.** В философском смысле указанные ограничения не возникают здесь потому, что дисплеи данного подкласса создают образы, адекватные по размерности и информационной емкости тем ракурсам-изображениям, которыми оперирует зрение человека при восприятии объектов реального мира. Следует подчеркнуть, что двумерные проекции трехмерной сцены, полученные на двумерной рабочей среде (или на сетчатке глаза) представляют в интеллектуально-сжатом виде всю полноту информации об объеме исходной сцены. Интеллектуальность сжатия исходной трехмерной сцены в двумерную проекцию состоит в том, что автоматически обеспечивается учет оптического перекрытия передними объектами задних объектов (чего нет в трехмерном объектном образе, как показано выше).

Для трехмерных дисплеев данного подкласса характерна высокая гибкость технических решений.

**Требования к параметрам рабочей среды и датчику информационного сигнала.** Указанные требования, как правило, практически не отличаются от требований к рабочей среде и датчикам сигнала, предъясняемых обычными (моноскопическими) дисплеями. По сути для данного подкласса в подавляющем большинстве случаев подходят те же двухкоординатные стандартные датчики, которые используются для работы со стандартными моноскопическими дисплеями. Единственная проблема (которая успешно решается) – удвоение числа оптических каналов съема информации в датчике.

**Учет психофизиологических факторов восприятия.** Наиболее существенная проблема стереоскопических дисплеев – возможное рассогласование аккомодации и конвергенции, что вызывает повышенную утомляемость зрения. Однако эту проблему можно смягчать в любой степени за счет физического отдаления плоскости предъяснения образов от наблюдателя, а также вообще практически ликвидировать указанную проблему, если применить *оптическое* удаление плоскости предъясняемого образа за счет применения соответствующих оптических элементов (например, сферических зеркал или голографических экранов).

Многоракурсность здесь также технически реализуема, например, путем формирования смежных зон наблюдения с воспроизведением в них соседних ракурсов.

Наиболее сложно здесь реализовать эффект «оглядывания», поскольку необходимо обеспечить точное слежение за положением зрачка наблюдателя и подстраивать с такой же точностью угол съема информации от исходной сцены, и это технически реализуемо при необходимости.

Единственное противопоказание к применению любых коммутационных стереоскопических средств – если есть предрасположенность к эпилепсии у потенциального наблюдателя, которая может иметь следствием непереносимость быстроменяющейся яркости предметов. Однако всегда остается возможность реализации для этого случая двухканальных стереоскопических систем, где в принципе нет попеременной смены яркости между глазами, и поэтому такие стереоскопические системы приемлемы для всех. Правда, есть некоторые люди, которые в принципе вообще не способны видеть стереоскопическое изображения, однако в таком случае, по всей видимости, и сцены реального мира воспринимаются такими людьми существенно более «плоскими», поэтому новых ограничений стереоскопические системы и в этом случае не создают.

### 3.2. КЛАСС «ДИСПЛЕИ С СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВЫМ ОБРАЗОМ»

*Физический признак реализуемого (на современном н/т этапе) субкласса – интерференционная запись дифракционного (трехмерного или двумерного) образа*

**Критическое ограничение класса – проблема реализуемости динамической рабочей среды с требуемыми параметрами.** На практике требования к разрешающей способности динамической голографической среды составляют несколько тысяч лин/мм (исходя из минимального периода 0,2-0,3 мкм для регистрируемых интерференционных полос). В настоящее время отсутствие полноценной динамической среды с подобным разрешением, как двумерной, так и трехмерной, является наиболее серьезным препятствием для серьезного практического применения трехмерных дисплеев данного подкласса.

Подчеркнем, что речь идет о трудностях реализации только *динамических* сред с голографическим разрешением. «Статическая» конкурентноспособная голографическая среда существует – это различные варианты и производные фотографической эмульсии (получаемые в основном за счет сенсбилизации последней), из которых особую роль играет материал бихромированный желатин, позволяющий получить разрешение в несколько тысяч линий на мм и дающий дифракционную эффективность около 40-70% для восстановленных с объемных голограмм изображений. Однако такие среды в силу инерционности (а зачастую в силу одноразовости) никак не могут использоваться в качестве динамических рабочих сред, а целесообразны в применении только для формирования голограмм статических объектов, в первую очередь для формирования дифракционных оптических элементов на замену традиционным преломляющим (стеклянным) оптическим элементам или отражательным элементам с криволинейной поверхностью, и такие голографические оптические элементы могут с успехом применяться во всех классах трехмерных дисплеев.

При этом следует указать, что когда иногда говорят об информационной «избыточности» голографической записи, то на самом деле имеется в виду;

а) избыточность относительно записи обычного фотографического изображения, которое воспроизводит только один ракурс. Относительно записи объемного отображения здесь нет избыточности, поскольку в одной и той же рабочей среде (в статической или динамической голограмме) записаны сразу все требуемые ракурсы объемного изображения интегрально, со взаимным наложением без взаимовлияния (в пределах линейного участка передаточной функции рабочей среды),

б) распределенный характер размещения информации о каждой точке исходной сцены – по всей поверхности рабочей среды или по ее участкам, что резко снижает возможность потери информации при воспроизведении каких-либо точек сцены при нарушении целостности каких-либо участков рабочей среды (последнее вызовет только ухудшение качества предъявляемого изображения).

Голограмма является рекордсменом по интегральности представления многих ракурсов в единой записи и по надежности хранения информации, но именно это и является причиной предъявления крайне высоких требований к разрешающей способности рабочей среды. Голограмма «слишком рано родилась» относительно уровня развития существующих динамических рабочих сред, но это не значит, что она автоматически решит проблему трехмерного дисплея просто при появлении соответствующей ей по параметрам динамической среды из-за необходимости постепенного создания соответствующей инфраструктуры, в частности, датчиков-генераторов дифракционного образа в реальном времени.

**Требования к параметрам датчика информационного сигнала.** Для оптической записи информации о динамичных сценах реального мира необходимо использование мощных лазерных источников с тремя различными основными цветами, что представляется весьма проблематичным как практический вариант, поскольку сцены с участием живых объектов (человека и животных) снимать при таких условиях практически невозможно. Также практически проблематично снимать видовые сцены, поскольку требуется освещать большой объем пространства, а фоточувствительность гипотетической динамической (которая может появиться в отдаленном будущем) голографической среды должна быть очень высокой.

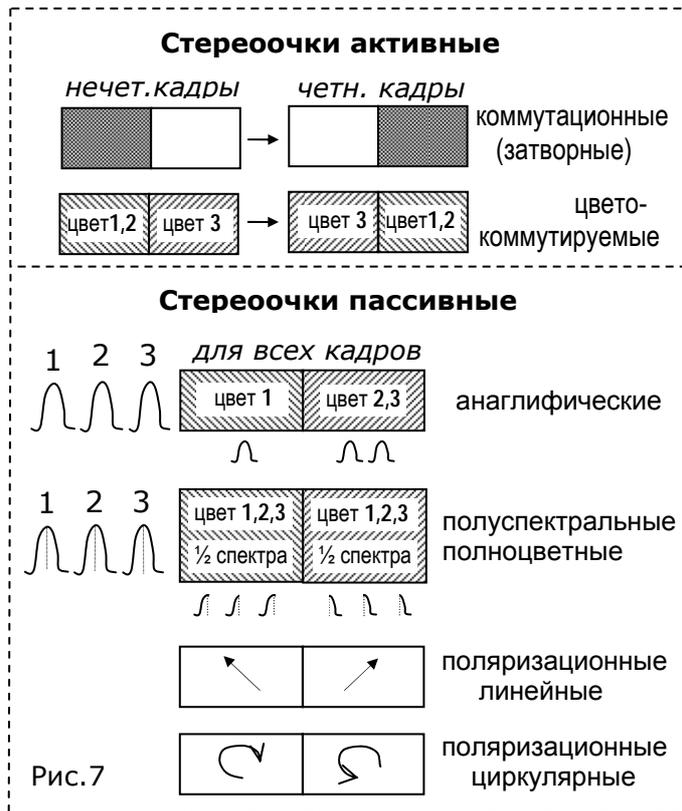
Использование нелазерных источников света практически в этом случае невозможно, поскольку, например, ртутные лампы не позволяют обеспечить требуемую яркость освещения, а иные источники света не обладают достаточной пространственно-временной когерентностью, чтобы сформировать интерференционные полосы достаточной видности (контраста) для получения полноценной голограммы.

Для формирования полноцветного изображения невозможно обойтись одной толстослойной голограммой; нужно три голограммы для реализации трех парциальных цветоделенных изображений.

При этом при записи голограмм (а при использовании тонкослойных голограмм также и при их восстановлении), не избежать проблемы зашумления полезного изображения муароподобной мелкозернистой стохастической картиной («спеклом»), возникающей из-за высокой степени пространственно-временной когерентности лазерного света, причем избавиться от спекла за счет снижения когерентности весьма проблематично, поскольку это приведет к снижению видности регистрируемых интерференционных полос в голографической записи (к снижению оптической эффективности последующего восстановления записи).

Кроме того, чисто оптический метод формирования голографической структуры неприменим для голографического воспроизведения видеoinформации в реальном времени, поскольку имеющиеся источники видеoinформации, как правило, генерируют электронные видеосигналы. Поэтому решать проблему реализуемости трехмерного дисплея с динамической голограммой приемлемо только на пути синтеза аналога голографической (интерференционной) картины из исходных сигналов электрической природы.

**Свойства голографически воспроизводимого образа отвечают всем основным психофизиологическим особенностям зрения.** Голограмма характеризуется уникальными свойствами восстанавливаемого с нее визуального образа, поскольку восстанавливает практическую полную информацию о комплексной амплитуде той световой волны, которая шла от объектов исходной сцены в момент регистрации голограммы. Поэтому наблюдение формируемого голограммой оптический образа сцены теоретически тождественно прямому наблюдению световой волны ис-



(что не исключает его применения для решения частных задач, где критические недостатки данного класса дисплеев проявляются в наименьшей степени).

Подкласс «спектрально-трехкоординатные дисплеи» может быть реализован пока только на основе динамических толстослойных голограмм удовлетворяет первичным факторам перспективности по свойствам предъявляемого образа сцены, но оказывается пока только условно реализуемым из-за наличия фактически единственной подходящей рабочей среды – акустооптических модуляторов (АОМ). Только АОМ дать надежду на будущее практическое применение дисплеев данного класса (см. разделы 7-8), однако одномерность последних ведет к проблематичности построения конкурентноспособных схем трехмерных дисплеев, особенно громоздких в полноцветном варианте формируемого образа 3Д сцены.

Чтобы подтвердить указанный первичный выбор, сравним реальную конкурентноспособность обоих реализуемых подклассов - объектно-двухкоординатные дисплеи и объектно-трехкоординатные дисплеи в решении различных групп современных задач объемного отображения. Сначала рассмотрим принципы работы и параметры реально выпускаемых трехмерных дисплеев, начиная со стереоскопических.

#### 5. ПРАКТИЧЕСКИ РЕАЛИЗОВАННЫЕ (ВЫПУСКАЕМЫЕ) ОБЪЕКТНО-ДВУХКООРДИНАТНЫЕ ДИСПЛЕИ

На практике объектно-двухкоординатные дисплеи, как правило, реализуются в форме дисплеев, традиционно именуемых стереоскопическими. Классический стереоскопический дисплей – дисплей с разделным предъявлением левого и правого ракурсов 3Д сцены в форме пары 2Д изображений. Многие стереоскопические дисплеи выполнены могут быть выполнены на базе обычных (моноклопических) дисплеев, снабженных стереоскопическими приставками (дополнениями). Такая преемственность от моноклопических к стереоскопическим дисплеям способствует экономически наиболее эффективному пути развития трехмерных дисплеев и их инфраструктуры.

Требуемый стереоскопический формат (формат представления пар ракурсов) реализуется соответствующим выбором источника стереоскопического сигнала, например, записью на стандартных цифровых носителях - CD, DVD, жестких дисках, генерацией компьютером, передачей по стандартным телевизионным каналам и т.д.

**Способы наблюдения ракурсов.** Следует отличать стереоскопический формат (способ представления ракурсов – см. рис.3) от способа предъявления ракурсов глазам наблюдателя. Варианты последнего – параллельное предъявление, последовательное предъявление и параллельно-последовательное. Последовательное предъявление соответствует попеременному предъявлению левого и правого ракурсов соответствующим глазам (на время предъявления ракурса определенному глазу другой глаз остается в темноте). Параллельное предъявление соответствует параллельному поступлению левого и правого ракурсов соответственно в левый и правый глаза. Последовательно-параллельное соответствует параллельному предъявлению обоим глазам неполных ракурсов, которые взаимно дополняются в последовательные промежутки времени до полных (например, предъявляются в каждом кадре неполные цветоделенные ракурсов, которые в сумме двух смежных кадров дают полный цветной ракурс).

Способ предъявления определяется логикой работы применяемого средства наблюдения. Последовательное предъявление реализуется при применении коммутационных средств (раздел 5.1) – коммутационных (активных) стереочков (рис.7, вверху) и стереопанелей (рис.9), которые обеспечивают коммутацию светового потока изображения в соответствующий глаз наблюдателя при предъявлении нужного ракурса на экране дисплея. Параллельное предъявление реализуется при использовании, например, двухканальных стереоскопических систем с пассивными стереочками (рис.7, внизу), в безочковых дисплеях или в стереочках с микродисплеями (раздел 5.2). Последовательно-параллельный способ наблюдения реализуется, например, при использовании цветокоммутируемых стереочков – (рис.7, вверху).

##### 5.1. СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ В ФОРМЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ПРИСТАВОК (СТЕРЕОЧКИ И СТЕРЕОПАНЕЛИ)

ходной сцены с реализацией эффекта «оглядывания» и эффекта полиракурсности (спектр ракурсов имеет здесь квазинепрерывный характер).

В дифракционном образе нет угловой селективности (как в случае представления трехмерного образа в предметной области), поскольку элементарные оптические волны, пришедшие в пространство голограммы от физически существующих или синтезированных объектов, образуют интегральную совокупность, в которой уже блокированы волны от «затененных» частей объектов. А трехмерный объектный образ - дифференцированная по пространству совокупность, интегрирование которой не состоялось до процесса ее наблюдения.

#### 4. ПЕРВИЧНЫЙ ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО БАЗОВОГО ПОДКЛАССА ТРЕХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЕВ

Из вышеприведенного анализа следует, что первичным факторам реализуемости удовлетворяет только подкласс «стереоскопические дисплеи» (на основе объектного представления трехмерной сцены в виде ее двумерных проекций).

Подкласс «объектно-трехкоординатные дисплеи» следует признать неудовлетворяющим указанным первичным факторам, что в сочетании с крайней сложностью реализации таких дисплеев (очень высокими требованиями, предъявляемыми к параметрам рабочей среды, источника информационного сигнала, а также из-за необходимости в ряде вариантов применять трудно выполнимые динамические оптические системы) ведет к первичному выводу о неперспективности такого класса дисплеев в ближайшем (10-20 лет) будущем в широком смысле - для решения широкого круга задач

Прежде всего рассмотрим физические основы работы и технические параметры жидкокристаллических (ЖК) стереочков и стереопанелей, являющихся основой реальных стереоскопических приставок (дополнений) к стандартным моноскопическим дисплеям.

**Физический механизм работы практических коммутационных стереочков и стереопанелей.** Коммутация светового потока изображения в стереочках осуществляется за счет попеременного просветления/затемнения двух окон. В каждом окне между поляроидами (со скрещенными осями поляризации) находится слой ЖК, осуществляющего при приложении управляющего напряжения вращение вектора поляризации проходящего света на  $90^\circ$ , что приводит к затемнению окна при приложении напряжения и к просветлению при отсутствии напряжения. В отсутствие напряжения состояние поляризации света может здесь быть даже стохастическим (неопределенным) – все равно поляризатор с линейной поляризацией пропустит этот свет.

Стереопанели работают в сочетании с пассивными поляридными очками, в которых имеются два полярида со взаимно ортогональными состояниями поляризации (линейной или циркулярной), поэтому от стереопанели требуется обеспечить два соответствующих взаимно ортогональных состояния поляризации на своем выходе (стохастическое рабочее состояние поляризации недопустимо).

Прежде всего заметим, что в выпускаемых коммутационных стереочках и стереопанелях используются только нематические ЖК материалы в качестве рабочего вещества. На практике в стереочках и стереопанелях применяется т. н. пи-ячейка ( $\pi$ -ячейка), существенными отличительными признаками которой являются (рис.8,а):

- углы  $\theta$  начального наклона ЖК молекул, прилегающих к разным сторонам ЖК слоя, выбраны одинаковыми по абсолютной величине ( $3^\circ$ - $5^\circ$ ), но разными по знаку,
- вариации фазы света, проходящего пи-ячейку, не превосходят  $\pi$  радиан при изменениях величины управляющего электрического поля  $E$  от близкого к нулю минимального значения до максимального - около 30V – значения (за счет выбора соответствующих толщины ЖК слоя, как правило, величиной 4-6 мкм, и параметров диэлектрической анизотропии ЖК).

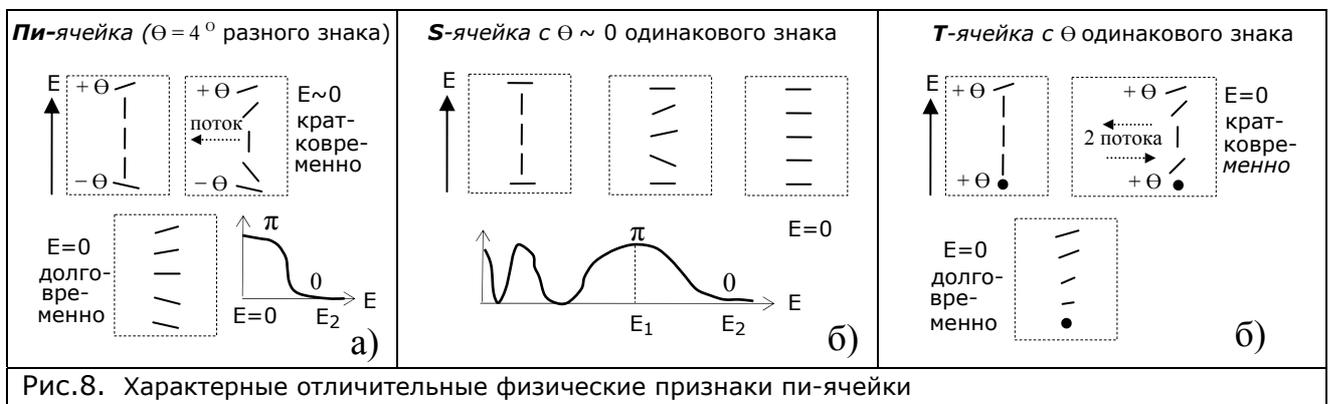


Рис.8. Характерные отличительные физические признаки пи-ячейки

Структура пи-ячейки в классическом виде, позволяющая работать с белым светом, (рис.8,а) предложена в [4], где указано, что только в такой структуре осуществляется быстрый оптически неосциллирующий переход в состояние с максимальной фазовой задержкой  $\pi$  после кратковременного снятия управляющего напряжения  $E$ . Быстрый переход осуществляется благодаря однонаправленному потоку ЖК молекул в процессе их релаксации (этот поток показан стрелкой на рис.8,а, справа) при сохранении последнего состояния в виде метастабильного в течение десятков секунд - до появления исходной «веерообразной» структуры, соответствующей долговременной подаче  $E = 0$ .

Переход в последнюю указанную структуру вообще предотвращается при сколь угодно долгом выполнении условия  $E=0$ , если ввести в слой нематического ЖК оптически активную добавку холестерического ЖК (со спиралевидной структурой), вызывающего закрутку нематических ЖК молекул. Шаг спирали холестерического ЖК выбирают так, чтобы толщина нематического ЖК слоя равнялась, например, одной трети шага спирали холестерического ЖК, тогда состоянием с наименьшей энергией (устойчивым в течение неограниченно долгого времени) будет состояние ЖК слоя с фазовой задержкой  $\pi$ .

Эти черты отличают пи-ячейку от похожих ЖК-структур, описанных в более ранних работах [5-7], которые не могли быть практически применены в стереочках и стереопанелях по следующим причинам.

В [5] исследована S-структура для скоростной фазовой модуляции света с амплитудой  $\pi$  (рис. 8,б), где не созданы условия для работы (поворота) преимущественно центральных ЖК молекул, и углы  $\theta$  начального наклона не рассматриваются как параметр (могут быть близки к нулю), а используется одновременная переориентация большой (по толщине слоя) части ЖК молекул, из-за чего реализуется оптически осциллирующий (из-за многократного перехода через значение  $\pi$  фазовый отклик (рис.8,б, внизу), т.е. реализуется на самом деле задержка  $\pi n$ , где  $n$  - целое число, а для скоростной фазовой модуляции предложено выбрать два состояния ЖК слоя с переориентацией, близкой к максимальной (когда максимальна подвижность ЖК молекул из-за ставшей минимальной энергии связи с приповерхностными молекулами), соответствующие величинам  $E_1$  и  $E_2$  управляющего электрического поля (которыми фактически выбираются значения  $\pi N$  и  $\pi (N+1)$  для фазовой задержки, где  $N = 3-5$  на практике). Но поскольку здесь не ни одного квазистабильного состояния памяти (характерного для пи-ячейки) для какого-либо из рабочих значений фазовой задержки, то трудно добиться воспроизводимого высокого контраста переключения света (в скрещенных поляридах), поскольку для точной фиксации обоих значений фазовой задержки необходимо очень точно

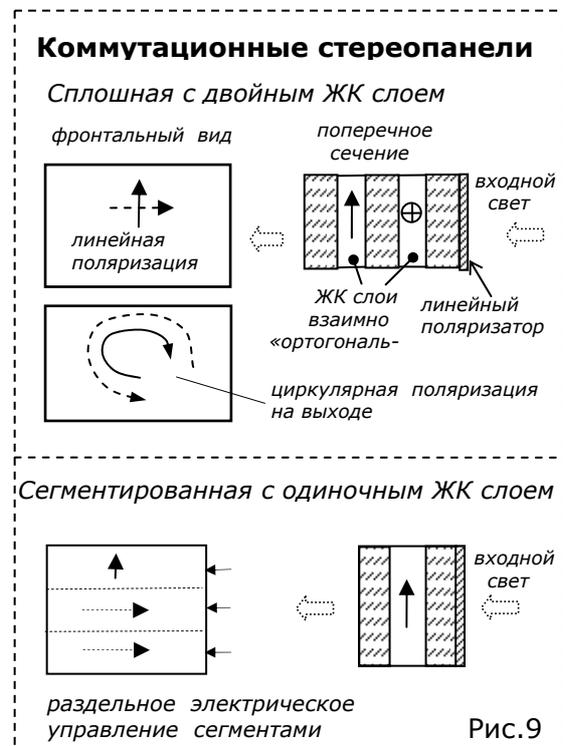


Рис.9

подбирать величину управляющего напряжения, соответствующее величине  $\pi$  для фазовой задержки, и это значение управляющего напряжения может сильно меняться от одного экземпляра ЖК ячейки к другому (зависит от вариаций параметров ЖК слоя). Кроме того, здесь имеет место очень сильная хроматическая дисперсия из-за того, что суммарный набег фазы равен  $\pi N$ , т.е. действие на проходящий свет оказывает гораздо большая оптическая толщина, чем в пи-ячейке (где оптическая толщина не превосходит  $\pi$ , и поэтому там хроматическая дисперсия минимальна), поэтому такую ЖК-структуру нельзя использовать для работы с белым светом.

Отличие классической пи-ячейки от другого предложения [6] состоит в том, что хотя в последнем исследовалась быстрая модуляция фазы света на величину  $\pi$  в Т-структуре (с  $90^\circ$ -закруткой приповерхностных ЖК молекул на в плоскости ЖК слоя) с заданными углами  $\theta$  начального наклона (рис.8,в), но последние выбраны здесь с одинаковым знаком для обеих сторон ЖК слоя, что ведет к существенной временной задержке перехода к значению  $\pi$  (к существенному ухудшению быстродействия переключения) после снятия управляющего напряжения вследствие получения двух разнонаправленных потоков ЖК молекул, вызывающих усилия кручения молекул, препятствующие их релаксации к исходному состоянию (два указанных потока отмечены стрелками на рис.8,в, справа).

Отличие пи-ячейки от следующего предложения [7], в котором были впервые предложены углы  $\theta$  начального наклона разного знака для разных сторон ЖК слоя, состоит в том, что здесь эти углы используются только с целью реализации механической мультистабильности состояний нематического ЖК слоя за счет создания периодической картины дисклинаций последних, возникающих в сингулярных точках ЖК структуры, расположенных периодически вдоль ЖК слоя и физически сформированных, например, за счет периодического изменения знака углов  $\theta$ , либо за счет периодического микрорельефа на поверхностях электродов, или за счет придания электродам заданной периодической конфигурации. При этом оптического различия (по фазовой задержке) между различными состояниями (т.е. результирующего наличия модуляции фазы света) в данном случае может и не быть вообще, поэтому для оптической дифференциации состояний здесь предлагается, например, вводить дихроичный краситель.

Одиночная пи-ячейка с холестерической добавкой широко используется в стереочках, поскольку дает достаточно высокий контраст при приемлемом быстродействии (см. табл.1, строка 2), либо пи-ячейка с дополнительной двупреломляющей пленкой и измененной ориентацией анализатора линейной поляризации с целью компенсации эллиптичности результирующего света (в стереочках CrystlaEyes – табл. 2, строка 1) [8,9].

Однако пи-ячейка с холестерической добавкой или двупреломляющей пленкой (оптическим компенсатором) не может работать в стереопанелях, поскольку состояние поляризации света в отсутствие напряжения является достаточно неопределенным (из-за наличия оптически активной закрутки ЖК молекул или фазового сдвига, вызванного компенсатором). В то же время одиночная пи-ячейка характеризуется невысоким контрастом (строка 1 в табл.1), который хотя и считается некоторыми изготовителями достаточным (и они применяют одиночную пи-ячейку с сегментированными электродами в стереопанелях - рис.9, внизу), все же это не является адекватным решением при условии, что стереопанели гораздо (на порядок и более) дороже стереочков, поэтому контраст стереопанелей не должен быть хуже. Кроме того, время релаксации одиночной пи-ячейки достаточно велико, и сказывается на качестве верхней части стереоизображения при высоких (120-160 Гц) кадровых частотах.

Для кардинального увеличения контраста и быстродействия коммутации света предложено техническое решение с двойными пи-ячейками (двойными ЖК пи-слоями), суть которых состоит в том, что два ЖК пи-слоя располагаются друг за другом так, что направления начальной ориентации ЖК молекул в указанных слоях взаимно ортогональны (рис.9, сверху) [10, 11].

Параметры всех указанных вариантов ЖК ячеек сведены в Табл.1. Одна и та двойная пи-ячейка может работать в двух режимах, определяемых блоком управления (контроллером). В пушпульном режиме (когда оптический переход в состоянии с фазовой задержкой  $0^\circ$  или  $\pi$  осуществляется подачей максимального электрического напряжения только на одну из ячеек по очереди) время реакции и время релаксации равны и малы (табл.1, строка 2), поскольку определяются временем принудительной ориентации ЖК молекул под действием указанного электрического поля, но контраст в параллельных поляроидах (для одного глаза наблюдателя) хуже, чем в скрещенных (для другого глаза) из-за того, что при отсутствии управляющего напряжения на ЖК слое начинает сказываться неоднородность ориентации ЖК молекул, которая обусловлена несовершенством механизма ориентации, и также присутствует существенная хроматическая дисперсия из-за двойного по  $\pi$  фазового набега, составляющего  $0^\circ$  в сумме (соответствующего состоянию с отсутствием фазовой задержки проходящего света). В скрещенных поляроидах (исходно темном состоянии) дисперсией можно пренебречь, но в исходно белом состоянии с параллельными поляроидами она уже сказывается на контрасте. При наличии же управляющего напряжения в пушпульном режиме на одной из ЖК ячеек ЖК молекулы принудительно выстраиваются электрическим полем, и контраст поэтому выше для этого состояния из-за меньшей суммарной оптической толщины (меньше хроматическая дисперсия и меньше неупорядоченных молекул на пути света). В режиме циркулярной поляризации (когда оптический переход в состояния  $\pm \pi/2$  осуществляется поочередным «опусканием» ЖК ячеек в данные состояния из ориентированного под действием поля состояния) контраст выравнивается для обоих состояний ЖК коммутатора, хотя быстродействие несколько ухудшается, поскольку вовлекается процесс самопроизвольной релаксации ЖК молекул в переход между состояниями (табл.1, строка 4).

Табл.1 Параметры коммутации света ЖК-ячейками, применяющимися в стереочках и стереопанелях

Вид ЖК ячейки	Контраст $K$ в скрещенных поляроидах	Контраст $K$ в параллельных поляроидах	Оптическая эффективность $E$ , (%)	Время реакции $T_{ON}$ , (мс)	Время релаксации, $T_{OFF}$ , (мс)
Пи-ячейка одиночная	12-15 : 1	8-10:1	30-35%	0,05-0,5	3
Пи-ячейка сдвоенная «пушпульная»	40-100:1	30-50 :1	25-27%		0,1
Пи-ячейка сдвоенная с независ. управлением	40-70 : 1	40-60 : 1	25-27%		1,5
Пи-ячейка одиночная с холестерической добавкой (6 мкм)	50-80 : 1	Не работает	20-25%		2,5 – 3
Пи-ячейка одиночная с холестерической добавкой (4 мкм)	70-100 : 1	Не работает	15-20%		2
Пи-ячейка одиночная с двупреломляющей пленкой	100-200:1	Не работает	30-35%		3

Контраст  $K$  – отношение интенсивности прошедшего света  $J_0$ , соответствующего открытому состоянию оптического коммутатора) к интенсивности прошедшего  $J_c$  света, соответствующего закрытому состоянию коммутатора ( $K$

=  $J_o / J_c$ ). Оптическая эффективность  $E$  – отношение интенсивности  $J_o$  к интенсивности  $J$  входного неполяризованного света ( $E = J_o / J$ ). Время реакции  $T_{ON}$  соответствует времени смены состояния оптического коммутатора, вызванное приложением управляющего напряжения (принудительный переход от исходной ориентации ЖК молекул в иницированную электрическим полем ориентацию). Время релаксации  $T_{OFF}$  соответствует времени смены состояния, вызванное снятием управляющего напряжения (релаксация ЖК молекул в исходное состояние).

Указанные пределы изменения времени  $T_{ON}$  соответствуют пределам изменения амплитуды управляющего напряжения от 12В (большее время реакции) до 30-40В (меньшее время), характерное соответственно для стереочков и стереопанелей.

Перечень имеющихся на рынке стереочков и стереопанелей приведен в табл. 2. Выпускаются как проводные модели стереочков, так и беспроводные (с передачей синхросигнала по ИК-каналу).

Табл. 2. Выпускаемые коммутационные стереочки и стереопанели

Наименование	Поставщик	Используемый вариант ЖК ячейки
<b>Стереочки</b>		
CrystalEyes 3 (беспроводные)	StereoGraphics (США) ( <a href="http://www.stereographics.com">www.stereographics.com</a> )	Пи-ячейка одиночная с двупреломляющей пленкой
3DS-GS (Панорама) (проводные)	Корпорация СТЭЛ (РФ) ( <a href="http://3dstereo.ru">http://3dstereo.ru</a> )	Пи-ячейка одиночная с холестерической добавкой (варианты с толщ. слоя ЖК - 4 и 6 мкм)
E-D (проводные)	E-Dimensional (США)	К ~40-50 :1, $T_{OFF} \sim 6-8$ мс
E-D (беспроводные)	( <a href="http://www.e-dimensional.com">www.e-dimensional.com</a> )	К ~60-80 :1, $T_{OFF} \sim 2-3$ мс
60GX (беспроводные)	NuVision(США) ( <a href="http://www.nuvision3d.com">www.nuvision3d.com</a> )	К ~40-50 :1, $T_{OFF} \sim 3$ мс (пи-ячейка с 12V управлением)
3DTV (проводные, беспроводные)	3DTV (США) ( <a href="http://www.3dmagic.com">www.3dmagic.com</a> )	К ~60 :1, $T_{OFF} \sim 2$ мс
<b>Стереопанели</b>		
Z-screen (диагональ 6 дюймов)	StereoGraphics (США) ( <a href="http://www.stereographics.com">www.stereographics.com</a> )	Пи-ячейка сдвоенная с независ. управлением
Z-screen (диагональ 21 дюймов)		Пи-яч.одиноч. (с сегментированными электродами.)
3DS-P6 (диагональ 6 дюймов)	Корпорация СТЭЛ ( <a href="http://3dstereo.ru">http://3dstereo.ru</a> )	Пи-ячейка сдвоенная с независ. управлением
3DS-P17 (диагональ 17 дюймов)		
17SX, 21SX (диагональ 17 и 21 дюймов соответственно)	NuVision (США) ( <a href="http://www.nuvision3d.com">www.nuvision3d.com</a> )	$T_{ONN} \sim 0,3$ мс, $T_{OFF} \sim 3,2$ мс

Следует отметить, что приведенные значения контраста ЖК стереопанелей не указываются зарубежными производителями в сопроводительной технической документации. Данные значения для иностранных производителей получены на основе анализа патентной документации, для отечественных стереопанелей и стереочков (и ряда зарубежных стереочков) - экспериментально измерены. Преимущество по контрасту двойных ЖК слоев подтверждены экспертными оценками. Например, в 1994 г. отечественные стереопанели с двойными ЖК слоями были представлены на выставке SEBIT (г. Ганновер), где специалисты немецкого института Coip (г. Потсдам) визуально сравнили качество сепарации ракурсов стереоизображения, обеспечиваемое указанными стереопанелями относительно стереопанелей производства фирмы Tektronix (США), хотя и дорогостоящих, но имеющих только один ЖК слой. Было отмечено существенно более высокое качество сепарации ракурсов (более высокий контраст) в отечественных стереопанелях, стоимость которых существенно ниже. В настоящее время фирмы StereoGraphics и NuVision выпускают стереопанели по той же технологии, которая применялась фирмой Tektronix.

Времена реакции и реакции, не превосходящие 1 мс, фактически не влияют на качество стереотображения, поскольку время между соседними кадрами (полями) для практически любой стандартной системы отображения составляет около 1 мс. Время релаксации в 2-3 мс слишком велико, поскольку время релаксации (за вычетом 1 мс на время между кадрами) определяет ширину зоны затемнения в верхней части, и ограничивает предельно допустимое значение кадровой частоты. Это обстоятельство ведет к целесообразности изготовления ЖК панелей на двойных ЖК слоях.

В стереочках всегда применяются ЖК-ячейки, работающие в скрещенных поляроидах с целью получения максимального контраста.

Контраст около 70-80 :1 является практически достаточным для многих применений. Увеличение до значений  $K=150-200$  дает некоторое улучшение сепарации ракурсов (уменьшение заметности перекрестных помех - ghosts). Дальнейшее увеличение контраста практически не даст результата, поскольку становится доминирующим влияние послесвечения люминофора (для мониторов на ЭЛТ) на появление перекрестных помех, и это влияние нельзя подавить при любом значении  $K$ . Можно применить метод электронного вычитания перекрестных помех, но только в случае, если указанные помехи появляются на некотором фоне соответствующего участка другого ракурса, имеющем некоторый уровень интенсивности, т.е. не являющиеся полностью черным (в последнем случае нечего вычитать).

Сравнительно недавно был предложен и исследован новый электрооптический эффект (в ЖК ячейке с определенными значениями углов  $\theta$  начального наклона разного знака, с заданными углами закрутки ЖК молекул и оптической толщиной нематического ЖК слоя [12]), суть которого состоит в образовании в ЖК ячейке после снятия внешнего электрического поля двух долговременно живущих взаимно оптически-компенсирующихся ЖК «подслоев», совокупное действие которых на фазу проходящего света практически не меняется в течение времени оптической релаксации ЖК молекул, составляющей десятки миллисекунд, при этом в режиме коммутации света контраст достигает величин несколько сотен к одному. Данный эффект позволил бы реализовать стереочки с рекордным значением контраста, если бы удалось решить проблему электрического управления временем релаксации (последнее сейчас определяется только свойствами ЖК слоя).

Для изготовления указанных отечественных ЖК ячеек для стереочков и стереопанелей используется технология ФГУП «НИИ Волга» (г. Саратов).

**Ограничения на применение коммутационных стереоскопических средств.** Коммутационные средства могут работать только с такими моноточечными дисплеями, которые характеризуются пренебрежимо малым остаточным высвечиванием предыдущего кадра во время просмотра текущего кадра – таковыми являются практически все компьютерные мониторы на ЭЛТ, телевизоры с ЭЛТ, некоторые плазменные дисплеи, ряд DLP-проекторов (на микрорезеркальных матрицах). Коммутационные средства не способны работать с ЖК мониторами вследствие того, что алгоритм смены кадров в последних специально рассчитан на максимальное время удержания предыдущей информации вплоть до момента смены ее на новую, при этом даже те из ЖК мониторов, которые рекламируются как быстродействующие, на практике таковыми не являются (например, ЖК монитор BenQ FP71E+ с указанным быстродействием 8 мс характеризуется, как показало независимое тестирование (<http://www.thg.ru>) реальным временем полной

смены информации не менее 20 мс (а заявленные производителем 8 мс относятся только к некоторым быстроме-няющимся цветовым компонентам изображения).

Поэтому для случая ЖК мониторов и ЖК видеопроекторов надо переходить к двухканальным стереоскопическим системам с применением поляризационной или спектральной сепарации ракурсов. Можно воспользоваться, если не предъявляются высокие требования к цветопередаче стереоизображения, анаглифической сепарацией, которая «работает» практически на любом цветном дисплее.

#### **Статическая поляризационная, цветовая и спектральная сепарация ракурсов.**

*Поляризационная сепарация.* Для «расшифровки» состояний поляризации света на выходе стереопанелей и двухканальных проекционных систем используют пассивные поляроидные очки как с линейной поляризацией, так и с циркулярной поляризацией (рис.7, внизу). Применение линейных поляризаторов дает более высокое значение сепарации ракурсов в двухканальных системах ( $K \sim 300-500 :1$  при применении высококачественной поляроидной пленки, например, выпускаемой фирмой НИТТО, Япония) по сравнению с циркулярными поляризаторами ( $K \sim 70-100 :1$ ), однако применение последних дает возможность наблюдателю наклонять голову без потери качества наблюдаемого изображения, в то время как при применении линейных поляризаторов даже небольшой наклон головы наблюдателя (в несколько угловых градусов) вызовет существенное снижение сепарации (на 30-50%). Уменьшенное значение контраста в циркулярных поляроидах вызвано наличием в них двоякопреломляющей пленки с фазовым сдвигом  $\pi/2$ , характеризующейся хроматической дисперсией (циркулярный поляроид состоит из линейного поляроида и указанной двоякопреломляющей пленки).

При применении поляризационной сепарации ракурсов в двухканальной проекционной стереоскопической системе необходимо использовать специальные экраны, обладающие способностью поддерживать поляризацию света. В России такие экраны выпускаются в НИКФИ (Москва) ([www.stereomir.ru](http://www.stereomir.ru)), за рубежом – например, фирмой Harkness Hall ([www.merlin.com.ru/Harknesshall.htm](http://www.merlin.com.ru/Harknesshall.htm)) или Silver Fabric ([www.silverfabric.com](http://www.silverfabric.com)).

*Спектральная полноцветная сепарация.* Чтобы можно было использовать любой обычный экран в стереопроекционной системе, недавно предложен метод спектральной (спектроразделительной) полноцветной фильтрации, состоящий в том, каждая из основных цветовых компонент R,G,B делится в энергетическом смысле пополам по спектральной шкале (соответствующими интерференционными светофильтрами), а наблюдатель снабжается соответствующими пассивными спектроразделительными стереоочками (рис.7, центр). Следует отметить, что экспертная оценка качества стереоизображения в такой реальной системе указывает на некоторое ухудшение цветопередачи по сравнению с поляризационной сепарацией, но имеет место выигрыш в яркости из-за отсутствия потерь при переводе стохастической поляризации в линейную (циркулярную).

*Анаглифическая (цветоразделительная) сепарация.* Если требования к цветопередаче стереоизображения невелики, и необходимо реализовать последнее с минимально возможными экономическими затратами, то можно применять анаглифические стереоочки, осуществляющие разделение ракурсов за счет цветоделения (рис.7, центр). В этом случае на экране дисплея предъявляется анаглифическая стереопара (рис.3,ж), в которой один ракурс (например, левый L) представлен одной основной цветовой компонентой (например, красной  $L_R$ ), а другой ракурс (правый R) представлен двумя цветовыми компонентами (зеленой  $L_G$  и синей  $L_B$ ), при этом в окнах очков установлены соответствующие спектральные фильтры, обеспечивающие поступление в один глаз наблюдателя компоненты  $L_R$ , а в другой глаз – компонент  $L_G$  и  $L_B$ . В этом случае в зрительном аппарате будут присутствовать формально все три основные цветные компоненты, и наблюдатель увидит близкое к полноцветному стереоизображение. Однако недостающие основные цветные компоненты в каждом из ракурсов вызывают ощущение зрительного дискомфорта, к которому постепенно вырабатывается привычка, но наблюдать по-настоящему полноцветное стереоизображение таким способом невозможно.

Выпускаются несколько практических вариантов анаглифических стереоочков. Наиболее сбалансирован по энергии световых потоков между глазами вариант с представлением R-компоненты в одном окне (в левом ракурсе), и суммы G+B –компонент в другом окне (в правом ракурсе), т.е. красно-зелено/синие очки. Такие стереоочки, выпускаются, например, в НТЦ «Стереokino» ([www.stereomir.ru](http://www.stereomir.ru)) и фирмой Anachrome ([www.anachrome.com](http://www.anachrome.com)), при этом в последних осуществляется легкая фокусировка в окне, соответствующем R-компоненте (для компенсации природной размытости изображения в этом цвете в зрении человека). Другим вариантом анаглифических очков являются синие/желтые очки ColorCode ([www.colorcode3D.com](http://www.colorcode3D.com)), в левом и правом окнах которых находятся фильтры B- и G+R –цветовых компонент соответственно.

Стереоочки с линейной и циркулярной поляризацией выпускаются, например, фирмой American Paper Optics ([www.3dglasesonline.com](http://www.3dglasesonline.com)). Сложившимся международным стандартом является расположение направлений линейной поляризации света под углами  $\pm 45^\circ$  относительно вертикали (рис.7).

Стереоочки со спектроразделительной фильтрацией поставляются фирмой Varco ([www.varco.com](http://www.varco.com)), разработавшая эти очки совместно с DaimlerCrysler.

**Цветоконмутируемая сепарация ракурсов.** Может быть применена, например, для того, чтобы существенно понизить мерцания наблюдаемого изображения при недостаточно высокой кадровой частоте, когда ее невозможно повысить, например, для стандартных телевизоров, кадровая частота в которых фиксирована и равна 50 Гц для телевизионных систем PAL, SECAM и 60 Гц – для NTSC. Критическая частота, при которой становятся малозаметными мерцания наблюдаемого стереоизображения, равна 40-50 Гц на глаз при условии, что оптически неадресуемые глаза (в промежутке между временами восприятия изображения) остаются в полной темноте. Исследования, проведенные в НИКФИ (Москва) в 1985-1987 гг. [13] показали, что если во время указанного промежутка неадресуемый глаз получает какой-то световой стимул вместо полной темноты, то заметность мерцаний существенно уменьшается. Для экспериментов была использована трехканальная видеопроекционная система на ЭЛТ, которая отображала в двух соседних кадрах две взаимно дополняющие друг друга цветокоммутируемые стереопары (рис.3,з), а в качестве указанного светового стимула были выбраны сами цветные компоненты изображения, которое «расщеплялось» на три цветные компоненты, предъявляемые обоим глазам последовательно-параллельно. Эксперименты показали успешное подавление мерцаний. К недостатку данного метода следует отнести заметное для глаза расслоение цветов на границах наблюдаемых объектов изображения в случае очень быстрого движения объектов.

*Цветоконмутируемые стереоочки.* В [13] также предложены цветокоммутируемые стереоочки с ЖК ячейками, работающими в сочетании с дихроичными светофильтрами для проведения экспериментов с цветокоммутируемыми стереоочками, в которых использовались дихроичные светофильтры в сочетании с ЖК п-ячейками. Было отмечено существенное снижение мерцаний стереоизображения с кадровой частотой 60 Гц, генерируемого персональным компьютером. Однако величина контраста результирующего изображения была невысокой (около 15:1) из-за малого цветового контраста примененных дихроичных фильтров, поэтому такие стереоочки использовать на практике пока нецелесообразно. Возможное дальнейшее развитие данного направления связано с поиском более высококонтрастных анизотропных (селективных к состоянию поляризации) цветных фильтров.

Похожий метод цветокоммутируемой селекции был в это же время независимо запатентован за рубежом [13].

**Стереопара с движущейся границей (ДГС).** Принцип дисплея, работающий с указанной стереопарой, предложен в [15] и достаточно подробно описан в [2].

## 5.2. ПРАКТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ, СПЕЦИАЛЬНО СКОНСТРУИРОВАННЫЕ КАК СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ

**Безочковые («автостереоскопические») дисплеи.** Ряд зарубежных компаний – SeeReal ([www.seereal.com](http://www.seereal.com)), Dimensional Technologies ([www.dti3d.com](http://www.dti3d.com)), Sharp, Philips, Stereographics ([www.stereographics.com](http://www.stereographics.com)), 4Dvision ([www.4d-vision.de](http://www.4d-vision.de)) выпустили несколько вариантов безочковых дисплеев, которые работают на основе матричной стереопары (рис. 3,и) в сочетании либо с линзовыми растрами, расположенными между ЖК матрицей и наблюдателем, либо с периодическими теневыми масками (параллаксными барьерами), расположенными между источником света и ЖК матрицей. Многоракурсность (multiview) реализуется за счет комбинирования световых потоков из разных ячеек матричной стереопары в требуемые зоны наблюдения ракурсов. При требуемом количестве  $V$  ракурсов исходное полное изображение с числом пикселей  $P_x P_y$  «разменивается» на  $P_x P_y / V$  изображений-ракурсов с соответственным числом  $P_x P_y / V$  пикселей. На практике из исходного изображения с разрешением 1280x768 или 1600x1200 реализуются в разных видах мониторов от 7 до 9 ракурсов с разрешением около (600-500)x400.

Некоторые из указанных мониторов могут работать как в стереоскопическом, так и моноскопическом режимах за счет электрического включения-выключения параллаксных барьеров. Применение параллаксных барьеров, являющихся масками поглощающего типа, ведет к существенному снижению яркости (до нескольких раз) в стереоскопическом режиме сравнительно с моноскопическим.

Для устранения этого недостатка в [16] предложено использовать электрически активируемые поляризационные микролинзы, которые даже осуществляют, как утверждают разработчики, увеличение эффективности использования светового потока на 30% в стереоскопическом режиме относительно моноскопического за счет более эффективного использования светового потока с периферийных областей пикселей. Однако пока такой дисплей на рынке отсутствует.

Если зоны наблюдения имеют фиксированное расположение в пространстве, то появляется неудобства для наблюдателя – надо держать голову строго в зонах наблюдения, что особенно сложно в случае минимального количества ракурсов. Для последнего случая в ряде дисплеев применено слежение за положением головы наблюдателя и соответствующее поперечное смещение ракурсов за счет соответствующего механического поперечного сдвига параллаксных барьеров.

Opticality Corp. ([www.opticalitycorporation.com](http://www.opticalitycorporation.com)) (бывшая X3D) в своих многокурсных дисплеях использует пространственно-мультиплексированные спектроразделительные фильтры [17,18]. Стоимость рассмотренных «автостереоскопических» дисплеев колеблется от четырех-пяти до нескольких десятков тысяч долларов США, и они предназначены для корпоративного сектора рынка.

**«Автостереоскопический» дисплей с применением вычислений, имитирующих работу нейросетей.** Заслуживает отдельного описания безочковые стереоскопические устройства фирмы NeurOK ([www.neurok.ru](http://www.neurok.ru)), которые реализуются по оригинальным схемам, не использующим традиционные форматы стереоизображений. Здесь используется адаптивный компьютерный синтез стереопар, формируемых с применением, например, двух последовательно оптически связанных просветных матрично-адресуемых дисплеев с определенным расстоянием между ними для варианта прямого наблюдения [19], или с применением пары видеопроекторов и отражательного экрана с нелинейно-отражающим покрытием [20]. Двумерная информация, соответствующая левому и правому глазам наблюдателя, вводится соответственно в первый и второй дисплеи (видеопроекторы) первоначально в «сыром» виде, и далее эта информация модифицируется (за 10-20 итераций компьютерных вычислений) с получением двух соответствующих (каждому положению наблюдателя) ракурсов, при этом вычислительный процесс моделирует работу нейронных сетей.

Достоинством такого решения является сохранение полного исходного разрешения дисплеев в результирующем стереоизображении, а также (по утверждению разработчиков) обеспечение согласования аккомодации и конвергенции. Недостатками являются (по приведенным в <http://really.ru> визуальным оценкам работы реального дисплея Smartgon, выполненного по предложенной в [19] системе): недостаточно высокая четкость результирующего изображения (пока уступающая дисплеям со стереочками) и существенное запаздывание (60 мс) формирования последнего при использовании стандартного РС с двумя видеокартами (каждая из которых поставляет информацию в соответствующий из двух дисплеев). Запаздывание, по всей видимости, можно в итоге устранить за счет применения более производительного процессора, но вопрос максимально достижимой четкости изображения пока остается открытым, поскольку решаемая указанным способом задача не имеет теоретического точного решения для произвольной сцены, решение находится приближенно за счет минимизации величины ошибки между предсказанными, выдаваемыми дисплеем ракурсами, и опорными ракурсами (в качестве последних выступают исходные двумерные изображения-ракурсы, подаваемую в вычислительную систему дисплея).

**Стереочки с микродисплеями (стереошлемы).** Стереочки с разрешением 800x600 выпускаются - фирмой I-Glasses на ЖК-микродисплеях фирмы Microdisplay ([www.microdisplay.com](http://www.microdisplay.com)) по технологии LCOS (Liquid Crystal On Silicon) с последовательным воспроизведением трех основных цветов. Данные дисплеи имеют стоимость от 800 долларов США при приемлемом качестве (четкости, яркости и цветопередаче) изображения, поэтому могут применяться в бытовых игровых компьютерных системах. Фирмой Emagin ([www.emagin.com](http://www.emagin.com)) – выпущены стереочки с разрешением 800x600 на микродисплеях с органическими светодиодами (OLED), однако здесь пока невысокая (70 кд/м<sup>2</sup>) яркость изображения, а стоимость достаточно велика (\$2800). Фирма Кайзер ([www.keo.com](http://www.keo.com)) выпускает нашиваемые стереоскопические дисплеи, которые имеют пространственное разрешение до 1024x768 при угловом поле зрения (field-of-view FOV) от 30° - 50° и предназначены в основном для специального применения.

## 6. РЕШЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЗАДАЧ ОБЪЕМНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Современные задачи объемного отображения можно разделить на четыре основных группы по требованиям, предъявляемым к объемным изображениям.

К **первой** группе относятся задачи, в которой доминантой является требование *высокой информативности* в отображении, а именно:

- научно-техническое проектирование, моделирование, дизайн, цифровая обработка аэрокосмических, геодезических данных.
- медицина, образование, естественно-научные исследования,
- контроль качества изделий.

Ко **второй** группе относятся задачи, связанные с бытовой мультимедийной техникой, где требуется *высокая зрелищность*:

- телевидение и видеотехника (фильмы на цифровых носителях, эфирное вещание),
- компьютерное отображение (игры, фотографии, видео),
- домашние кинотеатры (на основе видеопроекторов).

К **третьей** группе относятся профессиональные средства, которые призваны обеспечить для зрителя «погружен-ность» в наблюдаемую объемную сцену:

- цифровые электронные кинотеатры для массового видеопоза
- профессиональная техника симуляции (тренажеры наземных и летательных аппаратов), видеоаттракционы, системы виртуальной реальности.

К **четвертой** группе относятся задачи, в которых доминирует *мобильность* (малые габариты и вес) и *надежность*:

- дистанционное зондирование в недоступных или опасных зонах (в том числе с переносом изображения в разные области спектра), охранные системы,
- навигация и дисплеи на летательных аппаратах, наземных средствах передвижения, судах.

К **пятой** группе относятся задачи, связанные с *рекламой*:

- реклама товаров и услуг, рекламно-сувенирная продукция, выставки и презентации научно-технических достижений.

## 6.1. ПЕРВАЯ ГРУППА ЗАДАЧ (ВЫСОКАЯ ИНФОРМАТИВНОСТЬ ОБЪЕМНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ)

**Общая характеристика первой группы задач.** Разрешение изображения должно быть не хуже 1024x768 цветных пикселей. Большинство уже существующего программного обеспечения (даже ориентированного на работу с моноскопическими изображениями) осуществляет на самом деле генерацию трехмерных сцен, а появляющееся на экране монитора изображение является одиночным ракурсом этих сцен, получаемым с помощью виртуальной видеокамеры, направление оси восприятия и угол обзора которой программно перестраиваются по запросам пользователя (манипуляциями с клавиатурой и мышью). Поэтому стереоскопические средства здесь применяются наиболее экономично и естественно, а именно, с целью получения стереоскопического изображения для многих наиболее популярных программ разработаны программные дополнительные модули (plug-ins) и просмотрщики (viewers), обеспечивающие вывод стереоизображения за счет перехода к двухракурсному (бинокулярному) режиму работы указанных виртуальных видеокамер. Такие программные модули разработаны как для IBM-совместимых персональных компьютеров, работающих с операционной системой Windows, так и для графических рабочих станций Silicon Graphics, Sun, Hewlett-Packard и др.

**Научно-техническое проектирование, моделирование, дизайн.** Стереоизображение реализовано в программах машиностроительного проектирования AutoCAD, CATIA VS, Mechanical Desktop, разрабатываемых фирмой Autodesk ([www.autodesk.com](http://www.autodesk.com)), EnSight ([www.ceintl.com](http://www.ceintl.com)) для моделирования литьевых прессформ, FieldView ([www.ilight.com](http://www.ilight.com)) для калькуляции динамики жидкостных сред, I-Deas Master ([www.sdrc.com](http://www.sdrc.com)) для создания электронных прототипов летательных аппаратов, IGRIP ([www.deneb.com](http://www.deneb.com)) для конструирования рабочих ячеек роботов, Megavision ([www.matra-datavision.com](http://www.matra-datavision.com)) для визуализации пространственного расположения и взаимодействия сложных конструкций, RobCAD ([www.technomatrix.com](http://www.technomatrix.com)) для конструирования гибких автоматизированных систем, Solid-Edge, SolidWorks ([www.solid-edge.com](http://www.solid-edge.com)) для твердотельного моделирования механических конструкций, FON Studio ([www.conreality.com](http://www.conreality.com)) для архитектурного проектирования, APEX ([www.pcigeomatic.com](http://www.pcigeomatic.com)), программный комплекс фирмы TALKA ([www.talka-tdv.ru](http://www.talka-tdv.ru)) для объемных цифровых ортофотопланов земной поверхности с целью однозначного определения ее рельефа (различения высот от впадин) и измерения его параметров по третьей координате. Все эти программы тестированы фирмой StereoGraphics на успешную работу со стереоизображениями.

**Медицина, образование, естественно-научные исследования.** Стереоскопические очки применяются для лечения амблиопии (косоглазия) у детей в России ([www.astro.ru](http://www.astro.ru), [www.amblyopia.ru](http://www.amblyopia.ru)) и за рубежом. Имеются учебные курсы ([www.neotek.com](http://www.neotek.com)) по анатомии человека и животных, по флоре и фауне, по космическим исследованиям.

В качестве перспективного направления следует указать возможность изготовления стереоскопических видеоприставок к бинокулярным микроскопам, которые позволят как наблюдать объемные изображения микрообъектов на большом экране большого числа исследователей (студентов), так и осуществить запись таких изображений на стандартных видеомагнитофонах.

**Контроль качества изделий, робототехника.** Весьма перспективным является применение объемного изображения для контроля качества изделий, например, для дефектоскопии печатных плат и разного рода сварных соединений, где только объемное изображение позволяет идентифицировать объемную трещину на фоне различного рода визуальных поверхностных неоднородностей. В университете Carnegie-Mellon есть лаборатория 3Dstereoscopic Display Laboratory по применению стереоскопического отображения в робототехнике (<http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs/project/sensor-9/ftp/www/homepage.html>).

**Стереоскопические средства для первой группы задач.** Для наблюдения объемных изображений, генерируемых подобными программами, за рубежом принято применять беспроводные стереоскопические стереочки CrystaIEyes и стереопанели, выпускаемых фирмой StereoGraphics (табл.2) или безочковые специализированные стереоскопические мониторы. В России аналогичными параметрами обладает соответствующая продукция, выпускаемая Корпорацией СТЭЛ.

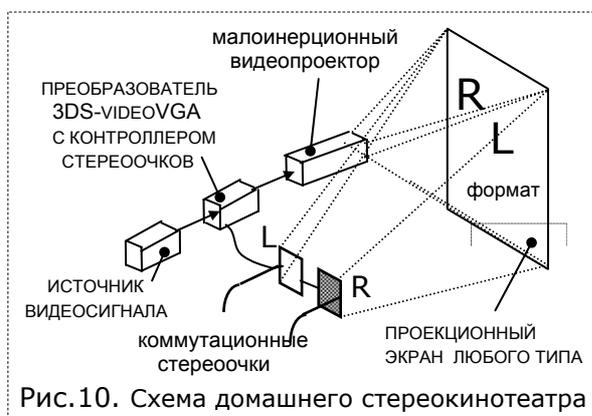
Поскольку стоимость специализированных стереоскопических мониторов высока, то при необходимости можно сделать такой же монитор, используя готовые линзовые растры ([www.stereoprint.ru](http://www.stereoprint.ru), [www.3dz.co.uk](http://www.3dz.co.uk)) в сочетании со стандартными ЖК мониторами, имеющими подходящий период расположения пикселей.

## 6.2. РЕШЕНИЕ ВТОРОЙ ГРУППЫ ЗАДАЧ (ВЫСОКАЯ ЗРЕЛИЩНОСТЬ ОБЪЕМНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ)

**Телевидение и видеотехника, квазистереоскопическое<sup>1)</sup> изображение.** Применение обычных (50-60 Гц) телевизоров дает заметные мерцание стереоизображения из-за низкой кадровой частоты, но можно минимизировать это мерцание за счет создания правильных условий наблюдения стереоизображения (отсутствие посторонних источников света в поле зрения). В этом случае можно получить приемлемые результаты при просмотре стереоизображений в системе NTSC (при 60 Гц кадровой развертке).

В настоящее время созрели предпосылки для скорого появления 100 Гц стереоскопических телевизоров, поскольку обычные 100 Гц телевизоры имеют алгоритм работы, несовместимый с возможностью воспроизведения стереоизображения. При этом здесь целесообразно развивать разнообразие алгоритмы автоматической конверсии моноскопических видеоизображений в квазистереоскопические, среди которых минимальные экономические затраты обеспечивают методы [21, 22], в которых не применяется обработка собственно изображений, а используется только модификация синхросигналов. Более реалистичных результатов можно добиться с применением обработки самих изображений за счет вычисления т.н. карты глубины (depth map) для конкретных сцен [23], но такое решение требует аналого-цифровой обработки видеосигналов. Для получения наиболее реалистичного автоматического квазистереоскопического преобразования изображения извлечение информации о карте глубины сцены (из структуры исходного моноскопического изображения) должно осуществляться с максимально полным выделением именно тех признаков,

которыми оперируют дополнительные факторы зрения (перечисленные в разделе 2.2.), поскольку иная информация о глубине просто отсутствует, с последующим синтезом искомого распределения глубины (depth map) на основе выделенных признаков. Синтезированное таким образом квазистереоизображение может быть очень «похожим» на настоящее стереоизображение в зрелищном отношении, что является достаточным для рассматриваемого класса задач (где не требуется строго документальная достоверность). Такого рода методы могут непрерывно совершенствоваться до очень высокого уровня реалистичности за счет нахождения все более удачных алгоритмов формирования «карты глубины», смены этих алгоритмов в зависимости от характера сцены, хотя документальной (фотографической) точности в принципе такими методами добиться нельзя. Для этого есть возможность оперировать, например, следующими характеристиками объектов сцены:



- параллакс вследствие движения (motion parallax),
- линейная перспектива (linear perspective),
- отбрасывание тени (shadowing) одним объектом на другой объект и затемнение (shading) объектов вследствие их удаленности,
- воздушная перспектива (aerial perspective),
- взаимное частичное перекрытие (occlusion, hiding, overlapping) одних объектов другими вследствие их соответствующего взаимного расположения (interposition) по глубине,
- относительный размер (relative size) объектов (чем больше объем объекта, тем больше площадь его двумерного изображения),
- различимость деталей в текстуре объекта (texture gradient) в зависимости от расстояния,
- цветовая яркость (чем ближе объект, тем более насыщенными воспринимаются его цвета).

**Компьютерное стереоотображение (игры, фотографии, видео, обучение).** Здесь нет проблемы с мерцанием стереоизображения, поскольку все современные компьютеры позволяют реализовать 100-120 Гц кадровую частоту изображения.

Уже сейчас реализована возможность получения полноценного стереоизображения во многих десятках самых популярных видеоигр при применении видеокарт фирмы nVidia ([www.nvidia.com](http://www.nvidia.com)) в персональных IBM-совместимых компьютерах (PC) [24]. При этом автоматически реализуется возможность просмотра стереофотографий с практически любым разрешением.

Фирма Neotek ([www.neotek.com](http://www.neotek.com)) создала программу TriD, обеспечивающую с возможностью проигрывания стереовидеоизображений телевидения высокой четкости ТВЧ (HDTV) на PC с применением формата «вертикальная стереопара».

Для съемки стереоскопических видеофильмов можно использовать внешнюю коммутационную приставку NuView к видеокамере, содержащую два ЖК затвора в двух оптических каналах, имеющих один общий выход, связанный с входом объектива видеокамеры. В качестве источника стереовидеосигнала или для получения стереофотографий есть возможность применять синхронизацию двух одинаковых обычных видеокамер или цифровых фотоаппаратов через порт дистанционного управления LANC с применением соответствующего внешнего синхронизатора.

Для домашнего применения созданы, например, программы квазистереоскопического преобразования DVD-фильмов (3Dplus 2.0 – [www.soft4d.com](http://www.soft4d.com)), или фильмов, представленных AVI-файлами (3Dproducer – [www.3dcombine.com](http://www.3dcombine.com)), программа StarStrider ([www.starstrider.com](http://www.starstrider.com)), моделирующая объемную карту звездного неба, выпускаются стереоскопические CD, DVD с высококачественными стереофотографиями природы ([www.virtual-adventure.net](http://www.virtual-adventure.net)), ряд устройств трехмерного ввода информации – трехмерные мыши, джойстики и другие принадлежностей для реализации элементов виртуальной реальности ([www.vrealities.com](http://www.vrealities.com)).

**Домашние 3Дстереокинотеатры.** На основе стандартных видеопроекторов с высокой (85-120 Гц) кадровой частотой можно создавать стереоскопические домашние кинотеатры, применяя, например, преобразователи видео-VGA разработки Корпорации СТЭЛ (<http://3dstereo.ru>), повышающие исходную кадровую частоту 50-60 Гц до 85-120 Гц с одновременным преобразованием вида развертки [2]. Использование здесь исходного (записанного на DVD) формата «попеременная стереопара» является оптимальным с позиции сохранения исходного разрешения. Альтернативное решение, примененное фирмой Sensio ([www.sensio.tv](http://www.sensio.tv)), и заключающееся в использовании исходного формата «горизонтальная стереопара», нельзя признать удачным из-за потери исходного разрешения вдвое по горизонтали. Уже появились доступные по цене серийные видеопроекторы (например, ASK Proxima C-170 или Benq PB-6210) с изображением достаточного разрешения (800x600 пикселей) и яркости (1000 люмен) для получения практически немерцающего (при кадровой частоте 85 Гц для затемненного помещения) стереоизображения, наблюдаемого с помощью стереочков или стереопанелей.

### 6.3. РЕШЕНИЕ ТРЕТЬЕЙ ГРУППЫ ЗАДАЧ (ВЫСОКАЯ ДОСТОВЕРНОСТЬ ОБЪЕМНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ, «ПОГРУЖЕННОСТЬ» В ТРЕХМЕРНУЮ СЦЕНУ)

#### **Стереоскопические электронные кинотеатры для массового кино-, видеопоказа, видеоаттракционы.**

Особенностью данной группы задач является очень высокое разрешение – не хуже 1500-2000 строк для видеопоказа на большом (десятки кв.м) экране, а также максимальная реалистичность объемного отображения.

**Квазистереоскопическое отображение.** В начале 2005 г. фирма In-Three, США ([www.in-three.com](http://www.in-three.com)) продемонстрировала ведущим западным продюсерам (Дж. Лукасу, Д. Камерону, Р. Родригесу, Р. Земекису и др.) результаты своей работы по квазистереоскопическому преобразованию оцифрованного электронного видеофрагмента из фильма Дж.Лукаса «Звездные войны». Впечатление от просмотра данного фрагмента с помощью коммутационных стереочков было столь велико, что заявлено о наступлении революции в сфере стереоскопического кинопоказа. Фирма Real D ([www.reald.com](http://www.reald.com)) приобрела в феврале 2005 г. фирму StereoGraphics «с целью переноса ее опыта в сферу развлечений». Студия Уолта Диснея (Walt Disney) при поддержке компании Дж.Лукаса (Lucasfilm Ltd. company) анонсировала конверсию мультфильма «Chicken Little» в квазистереоскопический вариант с целью показа в открываемых (совместно с Dolby Laboratories) в конце 2005 г. 100 стереоскопических кинотеатрах. Дж.Лукас заявил о намерении перевести весь фильм «Звездные войны» в квазистереоскопический вариант и создать сеть стереоскопического кинопоказа на базе цифровых видеотехнологий. Д. Камерон заявил о намерении снимать в стереоскопическом варианте большинство своих будущих фильмов.

Хотя по рекламным заявлениям трудно определить истинное развитие ситуации, но несомненно, что будет придан очередной мощный импульс появлению новых источников стереоскопического сигнала благодаря возможностям применения гибких мощных электронных средств обработки видеозображений. Продемонстрированное фирмой In-Three квазистереоскопическое преобразование выполняется на графических рабочих станциях при очень большом объеме ручного труда по правильной расстановке отдельных объектов сцены в пространстве с последующим много-

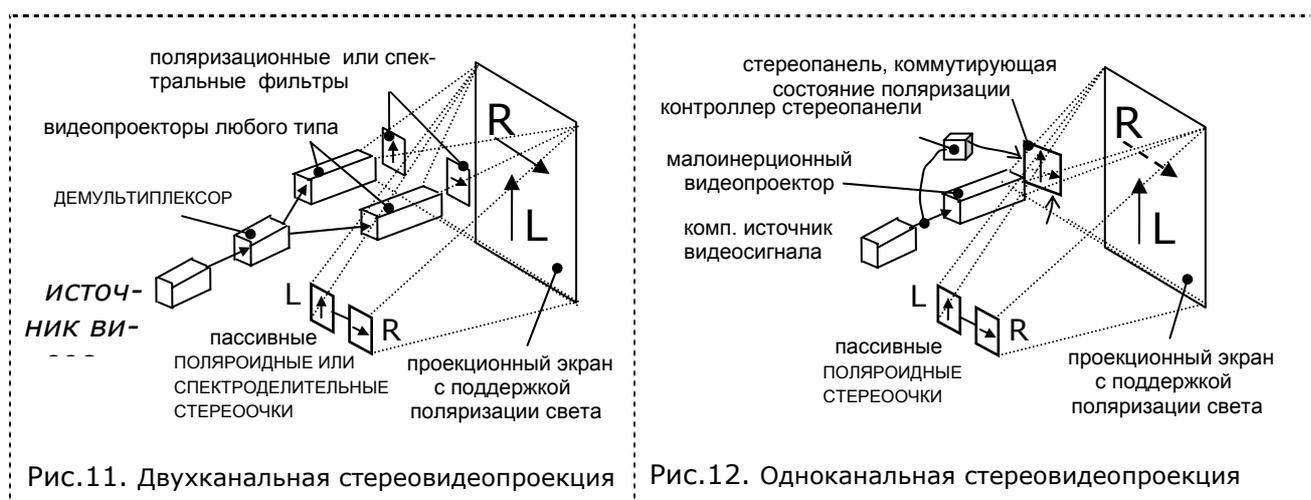
кратным интерактивным просмотром-коррекцией промежуточных результатов. Этот запатентованный In-Three метод [25-27] (получивший название «расширение измерения» - dimensionalization), и будет основой вышеуказанных работ по квазистереоскопическому преобразованию кинофильмов.

Следует отметить причины, по которым квазистереоскопическое преобразование кинофильмов может надолго получить преимущество над вариантом по созданию кинофильмов с «настоящим» (снятым двухканальными кино-видеокамерами) стереоизображением. Поскольку подавляющее большинство кинофильмов, где востребовано объемное изображение (например, все фильмы с панорамными динамичными сюжетами) создаются с широким привлечением компьютерной графики, то для создания подобных стереоскопических кино-видеофильмов нельзя просто обойтись натурными стереоскопическими съемками, а требуется создавать соответствующие («встраиваемые» в натурно снятые сюжеты) синтезированные на компьютере стереоскопические миры. В моноскопическом варианте кинофильма «стыковка» реального и виртуального миров не вызывает новых проблем, поскольку весь монтаж происходит в двумерном («плоском») пространстве. В случае объемного изображения появляется очень сложная проблема ручной «стыковки» реального и виртуального (синтезированного) миров в трехмерном пространстве, что надо делать при непосредственном творческом участии режиссера фильма. Поэтому даже ручная работа по трансформации «плоских» исходных изображений в стереоскопические оказывается более выгодной потому, что в исходном кино (видео) материале уже выполнена требуемая «стыковка» реального и виртуального миров с требуемым участием режиссера (который хорошо знаком с этой работой в двумерном пространстве), и остается только рутинная работа по размещению готовых объектов в пространстве, которую может выполнить любой оператор с хорошим стереоскопическим восприятием.

Что касается реалистичности получаемого таким способом объемного изображения, то следует подчеркнуть, что в сфере развлечения понятие реалистичности иное, чем достоверность (документальная, фотографическая точность). Например, обычная достоверная фотография костра часто не дает реалистичного (яркого) представления наблюдателю о том, каков был костер на самом деле (при съемке). В то же время картина с изображения костра, выполненная талантливым художником, может не быть достоверной в фотографическом смысле, но будет более реалистичной в художественном смысле, а именно, в картине-шедвре намеренно усилены такие черты изображения костра, которые позволяют зрителю получить именно то яркое эмоциональное впечатление, которое он испытывает в действительности при наблюдении реального костра.

Реализация стереоскопическим стереокинотеатров будет происходить в соответствии со схемами, представленными на рис. 11 и 12 в электронном виде, а также в специализированных панорамных стереоскопических кинотеатрах с применением широкоформатной киноплёнки, как в стереокинотеатрах I-MAX ([www.nescafe-imaxcinema.ru](http://www.nescafe-imaxcinema.ru)).

Фирмой Барко ([www.barco.com](http://www.barco.com)) выпускаются специально предназначенные для высококачественного стереовидеопроектора: на ЭЛТ - Barco Reality 908, 909, 912 с разрешением 3200x2500 при яркости 500 ANSI люмен (для работы с коммутационной стереопанелью), сдвоенный стереовидеопроектор на DLP - Barco Galaxy 12HB+ яркостью 12000 люмен, а также аналогичные ЖК-видеопроекторы (для работы по двухканальной схеме с пассивными поляризационными или спектроразделительными стереоочками). Фирма Christie ([www.christiedigital.com](http://www.christiedigital.com)) выпускает DLP-проекторы Mirage S+ с кадровой частотой 120 Гц, разрешением 1400x1050 и световым потоком несколько тысяч люмен. Фирма Initon ([www.initon.co.uk](http://www.initon.co.uk)) анонсировала выпуск стереоскопических проекционных систем с разрешением до 1600x1200 и световым потоком до нескольких тысяч люмен в каждом канале.



Могут также получить развитие стереоскопические видеотеатры, построенные по сотовому принципу – с индивидуальными безочковыми салонами просмотра, снабженными средствами слежения за головой зрителя, и использующие сферические зеркала для согласования аккомодации и конвергенции [28], применение которых позволяет также получить очень высокую яркость проекционного стереоизображения.

Ведутся также экспериментальные исследования по построению многоканальных безочковых стереовидеопроекционных систем (в которых используются в том числе многоканальные ЖК коммутационные затворы [29-31]), которые продолжили (в электронной версии) эстафету работ, проведенных в 1975-1985 гг. в НИКФИ по кинопоказу с использованием голографических изображений (с высокоразрешающей голографической киноплёнки) и с применением голографических экранов для мультиплексирования зон наблюдения.

**Техника компьютерной симуляции (имитации) - тренажеры наземных, водных и летательных аппаратов, системы виртуальной реальности и видеоаттракционы на их базе.** Здесь доминанта – истинная (фотографическая) достоверность, максимальное разрешение, панорамность. Требуется наивысшая достоверность отображения трехмерных сцен (внекабинной визуальной обстановки).

Для проекционных стереоскопических систем наиболее просто реализовать увеличение реалистичности объемного отображения за счет панорамного отображения (путем добавления периферийных стереоскопических проекционных модулей, чтобы задействовать периферийные области зрения наблюдателя), поскольку стыки между центральными и периферийными проекционными изображениями можно сделать малозаметными за счет электронной подстройки растров.

Интересным является использование тонкопленочных коллиматоров светового потока изображения (взамен традиционных линз или зеркал) [32] для комбинации искусственного стереоизображения с фоновым изображением, «отброшенным» в бесконечность.

За рубежом подобные системы создаются, например, фирмой FakeSpace Systems ([www.fakespace.com](http://www.fakespace.com)) в виде «видеостен» со стереоскопическими опциями, реализуемых с помощью коммутационных стереоочков или пассивных стереоочков, криволинейных зеркал.

**Дистанционное зондирование и наблюдение, охранные системы.** Техническое объемное зрение в недоступных человеку зонах (роботы-взрывотехники, исследование морских глубин, пещер, радиационных зон, эндоскопия в медицине, спасение людей) или в недоступных для непосредственного наблюдения областях спектра (тепловизоры, ультразвуковое отображение) весьма перспективно, поскольку стереоизображение позволяет улучшить различимость деталей изображения в условиях плохой видимости (зашумленность, малый контраст, цветовая монотонность изображения), при этом осуществляется визуальное подавление помех из-за распределенности внимания наблюдателя по трехмерному пространству объемного изображения (при моноскопическом отображении помехи фокусируются в той же плоскости, что и само двумерное изображение). Все эти задачи могут быть решены специализированными стереоскопическими системами, сконструированными для конкретной задачи.

Интересное решение для создания квазистереоскопического изображения для изначально моноскопических систем предложено в [33], где дополнительно к исходной высококачественной цветной видеокамере (вплоть до HDTV-стандарта) предлагается устанавливать дешевую моноскопическую черно-белую видеокамеру с целью генерации карты глубины для основного изображения (тогда не надо кардинально перерабатывать исходный дорогостоящий моноскопический датчик видеоизображения). С этой же целью предложено дополнить исходную моноскопическую видеокамеру датчиком зондирования пространственных координат объектов [34].

## 6.5. РЕШЕНИЕ ПЯТОЙ ГРУППЫ ЗАДАЧ (РЕКЛАМНЫЕ ЦЕЛИ)

Любые очковые или безочковые стереоскопические системы могут быть применены для этой цели, если создать специализированное программное обеспечение на основе уже имеющихся стереоскопических программных пакетов (software development kit - SDK), например, для создания виртуальных архитектурных макетов городов, информативных презентаций различных интерьеров, при этом с любым разрешением изображения и качеством его цветопередачи, на которые способны существующие моноскопические дисплеи.

Фирма Opticality Corp. создает для японского павильона выставки Expo2005 безочковый дисплей диагональю 180 дюймов (4,5 м), фактически заменяющий видеостену. Дисплеи данной фирмы обеспечивают для наблюдателя наибольшую свободу перемещения по сравнению со всеми другими имеющимися практическими безочковыми дисплеями.

Целую линию стереоскопических модульных устройств с очень большими составными экранами создана фирмой FakeSpace Systems.

## 7. ПРАКТИЧЕСКИ РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЕВ, НЕ ЯВЛЯЮЩИЕСЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИМИ

Таковыми дисплеями на практике пока могут быть только дисплеи с трехкоординатной разверткой (volumetric displays) или дисплеи с динамическими голограммами.

### 7.1. ДИСПЛЕИ С ТРЕХКООРДИНАТНОЙ РАЗВЕРТКОЙ

**Практически реализованные дисплеи с трехкоординатной разверткой (volumetric displays).** Одним из реально существующих дисплеев с трехкоординатной разверткой является дисплей DepthCube, разработанный фирмой Dimensional Media Associates и рекламируемый фирмой LightSpace Technologies ([www.lightspacetech.com](http://www.lightspacetech.com)), реально на нем продемонстрированы только изображения с очень гладкими (волнообразными) поверхностями (например, объемный график некоторого математического распределения). Данный дисплей имеет 20 плоскостей по глубине (вдоль оси Z – рис. 1,а) при разрешении 1024x768 и частоте смены информации 60 Гц [35]. Это подтверждает вывод (см. раздел 3.1), что такие дисплеи могут корректно воспроизводить только объекты определенного вида (каркасные).

По той же оптической схеме (рис.1,а) проведены эксперименты по применению трехкоординатной акустооптической развертки изображения в случае трехмерной среды, составленной из коммутируемых светорассеивающих плоскостей на основе ферроэлектрических ЖК ячеек [36].

Другой дисплей с трехкоординатной разверткой – производства фирмы Perspecta Spatial 3D System ([www.actuality-systems.com](http://www.actuality-systems.com)) – имеет 360-градусный обзор по горизонтали и 270 по вертикали, изображение формируется в сфере 20 дюймов (по принципу, указанному на рис. 1,б, – вращающийся проекционный экран) с 198 плоскостями, в каждой из которых 768x768 пикселей при частоте смены кадров 30 Гц. Реализована пока только палитра в несколько сотен цветов. Потребляемая мощность около 0,5 киловатт, для связи с PC используется ultraSCSI линия, вес 24 кг. На рекламных фото продемонстрировано только каркасное изображение, даваемое таким дисплеем.

**Отрицательные практические результаты исследований других вариантов дисплея с трехкоординатной разверткой.** В лаборатории 3D Technology Laboratories (Mountain View, США) исследовалось использование нелинейного взаимодействия лазерных ИК лучей в объеме твердотельного стекла или пластика, легированного примесью ионов редкоземельных металлов. В результате получена очень низкая (около 1%) эффективность взаимодействия, что требует применения мощных лазеров для получения достаточно яркого изображения в достаточно большом объеме. Столь мощные лазеры являются источником опасного для глаз невидимого излучения, требующего соответствующего защитного экрана вокруг дисплея. Также здесь трудно достичь высокого разрешения, а твердотельный сплошной массив рабочей среды ведет к системе с очень большим весом.

В лаборатории Actuality Systems (Кембридж, США) исследовалась система с линейной решеткой светодиодов, свет от которой отклоняется вращающимся многогранным зеркалом на быстровращающемся проекционный экран:

Однако быстровращающиеся компоненты в случае больших размеров экрана должны быть очень хорошо сбалансированы во избежание вибрации и возможного катастрофического разрушения. Здесь размер, форма и ориентация трехмерных пикселей (вокселей - voxels) зависят от их положения, в результате разрешение такого дисплея является позиционно-зависимым.

В лаборатории Neos Technologies (Мельбурн, Австралия) исследовалась система с акустооптическим сканированием лазерного луча, направляемого на быстро вращающийся спиральный проекционный экран (спираль Архимеда) большого размера. Здесь также требуется тщательная балансировка экрана большого размера. Система сканирования имеет недостаточное разрешение и малую скорость, что приводит к малому числу вокселей. Здесь также позиционно-зависимое разрешение. Существенно нелинейная форма экрана дисплея требует резкого увеличения объема вычислений для калькуляции парциальных двумерных изображений-слоев.

#### **Проблемы реализации и применения дисплеев с трехкоординатной разверткой любого вида:**

**Крайне высокие требования к рабочей полосе частот.** Чтобы отвечать требованиям высокой информативности объемного отображения, число разрешимых точек по глубине (координата Z) должно быть сравнимым с числом разрешимых точек по двум поперечным координатам X,Y (см. рис.1). Оценим, какие сложности стоят на пути реализации дисплея с трехкоординатной разверткой (volumetric display). Для развертки изображения 1000x1000xM пикселей потребуется в M большая полоса рабочих частот, чем при использовании моноскопических или стереоскопических дисплеев (M – число двумерных «слоев» вдоль координаты Z – см рис.1,а). Частота следования  $F_V$  трехмерных образов должна быть не менее 50-60 Гц, чтобы не допустить мерцаний наблюдаемого объемного изображения. При этом частота кадровой развертки каждого двумерного «слоя» должна быть  $F_V M = 50M$ .

Предположим, что  $M=100$  (это минимальная величина для условия информативности). Тогда кадровая частота развертки каждого слоя составит  $F_V N = 5$  КГц. Определим требуемую строчную частоту  $F_H$  для развертки каждого слоя, который содержит  $N=1000$  строк,

она равна  $F_n = F_{MN} = 5\text{МГц}$ . При 1000 пикселях на каждой строке общая рабочая полоса частот должна составлять 5 ГГц, а для полноценного разрешения (куб 1000x1000x1000 пикселей) требуется полоса частот в 50 Гц. Такие требования являются общими для дисплеев данного подкласса (не зависят от конфигурации последовательно-адресуемых слоев).

Проблемы с реализацией линии связи с такими сверхвысокими частотами (сверхвысокочастотного диапазона) весьма серьезны - надо применять специальные линии связи - полосковые линии, волноводы, при этом указанное излучение следует тщательно экранировать из-за его вреда для здоровья.

**Необходимо заново создавать мощный нестандартный источник сигнала для каждой задачи.** Невозможно использовать имеющиеся программы для компьютеров - надо совершенно заново создавать программное обеспечение для каждой задачи. При этом вычислительной мощности персональных компьютеров и графических станций недостаточно - надо иметь фактически суперкомпьютер для отображения даже стандартных сцен.

**Практическая невозможность отображать объекты реального мира.** Из-за практической невозможности создания трехкоординатного датчика информации об сценах реального мира данные дисплеи можно применять только для сцен, генерируемых компьютером..

**Невозможность отображать сцены глубиной больше, чем объем рабочей среды.** Стереоскопические дисплеи позволяют отображать сцены глубиной до километра и более при близкой к минимальной собственной толщине вещества рабочей среды. Для дисплея прямого наблюдения с трехкоординатной разверткой надо делать объем рабочей среды, равный объему отображаемой сцены.

**Невозможность для оператора-наблюдателя менять позицию наблюдения без потери корректности восприятия образа.** Угловая селективность в формируемом образе диктует фиксированное положение наблюдателя (см.раздел 3.1).

**«Изломанность» структуры изображения по координате Z.** Поскольку «пикселизация» трехмерного изображения здесь имеет место по все трем координатам (а по координате Z число пикселей будет всегда недостаточно, чтобы достичь реализуемости дисплея, как это следует из рассмотренных выше требований к полосе частот), то для достижения достаточно впечатляющей глубины не обойтись без увеличения расстояния между соседними пикселями по координате Z. Отсюда возникает дополнительная «изломанность» (особенно тонких линий) изображения по глубине. Этот недостаток можно частично компенсировать программными средствами, но это усугубляет ситуацию со сложностью и широкополосностью источника сигнала.

**Большие энергопотребление, вес для «твердотельного» дисплея прямого наблюдения.** Энергопотребление составляет не менее нескольких киловатт, исходя из параметров реализованных макетов.

Слои должны быть разделены промежутками достаточной толщины, чтобы получить требуемый объем сцены. Промежутки должны быть заполнены прозрачным веществом с возможностью создавать высокое оптическое качество контакта со слоем рабочего вещества. На практике пока только стекло удовлетворяет этому требованию. В итоге - вес в сотни килограммов для рабочей среды. Иной вариант (если делать воздушные промежутки между отдельными слоями с целью уменьшения веса) приведет к появлению множества границ перехода от одного значения показателя к другому (от показателя преломления воздуха к стеклу и обратно), что ведет к многократным переотражениям света, избавиться от которых возможно только с применением дорогостоящего прецизионного просветления - многослойных антиотражающих покрытий - на каждой указанной границе.

## 7.2 ДИСПЛЕИ С ПРЕДЪЯВЛЕНИЕМ ДИФРАКЦИОННОГО ОБРАЗА (С ДИНАМИЧЕСКИМИ ГОЛОГРАММАМИ)

**Дисплеи с двумерным дифракционным образом (с тонкослойной голограммой).** Такие дисплеи нельзя признать перспективными в первую очередь из-за необходимости применения лазерных источников света трех основных цветов для считывания голограмм, и неизбежного получения «спекла» в изображении. Нет информации о каких-либо практических экспериментах с дисплеями данного подкласса, работающих в реальном времени.

**Дисплеи с трехмерным дифракционным образом (с толстослойной голограммой).** Голографические дисплеи с электрическим вводом видеосигналов, подобно стереоскопическим дисплеям, совместимы с обычными (моноскопическими) дисплеями по размерности (двумерности) источника информации, хотя в случае голографического дисплея необходимо осуществлять трудоемкий процесс компьютерного вычисления дифракционного образа сцены. При этом для отображения объектов реального мира здесь возможно использование обычных двумерных датчиков с последующим компьютерным вычислением Фурье- или Френелевского дифракционного образа сцены. Отображение объектов синтезированных (на компьютере) сцен осуществляется наиболее естественным образом для такого рода дисплеев, поскольку компьютеру «все равно», какую двумерную функцию синтезировать и генерировать - описывающую сами объекты или их дифракционный двумерный образ.

Глубина отображаемого пространства здесь в принципе не ограничена, наблюдатель может менять положение с получением непрерывного набора ракурсов.

**Голографическое отображение на основе акустооптических модуляторов.** Для формирования голографических видеоизображений предложено применить акустооптические модуляторы (АОМ) на поверхностных акустических волнах - ПАВ [37] и АОМ на акустических волнах в объемной среде [38]. При вводе в акустооптический модулятор (АОМ) электрических сигналов сверхвысокой частоты получаемая ультразвуковая волна будет иметь длину волны, приближающуюся к длине волны света, и при достаточной толщине рабочей среды АОМ в его апертуре реализуются бегущие дифракционные решетки Брэгга, совокупность которых может формировать голографическую запись изображений, что подтверждено экспериментально [38] для случая многоканальных объемных АОМ.

Интересным является то обстоятельство, что при переходе к голографическому представлению видеoinформации высокая дифракционная расходимость ультразвукового луча (обусловленная миниатюрностью ультразвуковых излучателей, на которые подаются входные электрические информационные сигналы) перестает быть принципиальным препятствием для получения достаточно большого числа разрешимых элементов по координате пространственного мультиплексирования указанных излучателей (как это имеет место при растровой неголографической записи), поскольку взаимное наложение расходящихся волн с различающейся информацией в рабочей среде голограммы (в данном случае акустических волн от разных излучателей), вместе составляющих дифракционный образ сцены, является неотъемлемым атрибутом голограммы, обеспечивающим успешное восстановление итогового наблюдаемого изображения сцены.

Развитие таких дисплеев сдерживается серьезными проблемами, связанными с необходимостью реализации (с целью получения требуемого разрешения в изображении) очень высоких рабочих частот (порядка 10 ГГц и более) как для АОМ, так и для соответствующего многоканального источника электрических сигналов, из которых выделяется проблема сильного затухания СВЧ акустических волн в рабочих средах АОМ, которая ведет к существенному ограничению размера рабочей оптической апертуры, а также к существенным энергетическим затратам на преобразование входного электрического сигнала в соответствующую акустическую волну.

**О других предложениях голографических дисплеев с электрическим входом.** Вряд ли можно отнести к перспективным предложения по применению для голографического отображения, например, электрооптических дифракционных модуляторов в виде ЖК-на кремнии (LCOS) [39] из-за принципиально недостаточного пространственного разрешения для реализации голографических изображений с конкурентноспособными характеристиками. Здесь можно говорить только о дифракционном способе модуляции света для получения изображения в объектной области, и дифракция здесь используется как альтернатива поляризационной модуляции интенсивности света для возможного выигрыша по оптической эффективности модуляции, но здесь нет голограммы в истинном смысле этого термина (т.е. не формируется свертка предъявляемого изображения с импульсным откликом свободного пространства - см. раздел 1 - для получения наиболее ценных практических свойств голографического отображения).

## 8. О ВОЗМОЖНЫХ ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ ПОДКЛАССОВ ТРЕХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЕВ

### 8.1. ДИСПЛЕИ С ТРЕХКООРДИНАТНОЙ РАЗВЕРТКОЙ (VOLUMETRIC DISPLAYS)

Чтобы обойти проблемы с весом и взаимными отражениями в множестве слоев рабочей среды, можно пытаться разбивать направление с формированием многослойного действительного («воздушного») изображения при применении двумерной рабочей среды и динамически перестраиваемой оптической системы (рис. 1,в). Однако пока практически создать такую систему пока не удалось.

Чтобы свести к минимуму размеры трехмерной рабочей среды и ее вес в «твердотельном» дисплее (рис.1,а), можно отказаться от прямого наблюдения рабочей среды, перейдя к минимальным размерам последней с применением микромодуляторов света, а полученное трехмерное микроизображение перевести для наблюдения во вторичное трехкоординатное пространство с увеличением масштаба за счет трехмерной проекционной системы [39-40].

Также можно попробовать использовать здесь для некоторых задач трехмерный рассеивающий экран в виде искусственного «сухого» тумана (как в проекционной системе Fog Screen Inia - [www.fogscreen.com](http://www.fogscreen.com)).

Однако в любом случае не удастся избежать присутствия строгой угловой селективности в предъявляемом образе (раздел 3.1) для любой модификации дисплеев данного класса. Поэтому можно пытаться применять такие дисплеи только для определенных задач, где не играет особой роли взаимное затенение объектов, например, в томографии для тех случаев, когда достаточно каркасной визуальной модели организма, или в программах компьютерного проектирования объектов типа Шуховской телебашни.

Поэтому подкласс «дисплеи с трехмерным объектным образом» (volumetric displays) вряд ли можно в общем случае отнести к перспективным из-за «избыточной сложности», т.е. крайняя сложность в их реализации не оправдывается получаемыми функциональными возможностями объемного отображения (строгая угловая селективность).

### 8.2. ДИСПЛЕИ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ГОЛОГРАММАМИ

**Но основе акустооптических модуляторов (АОМ).** Необходимо решать проблему реализации достаточного числа разрешимых точек (отсчетов по теореме Котельникова) во вводимом сигнале изображения в условиях ограничения размера рабочей апертуры из-за сильного затухания СВЧ акустических волн в рабочей среде АОМ. Возможный путь обхода указанного апертурного ограничения (определяемого классическим критерием разрешения Релея  $w_D \sim \lambda_A/D_0$ , где  $D_0$  - размер апертуры,  $\lambda_A$  - длина акустической волны в среде АОМ,  $w_D$  - угловой размер минимально-допустимого разрешимого элемента в наблюдаемом изображении), обусловленного высоким затуханием акустических СВЧ колебаний (и поэтому ведущим к малому значению  $D_0$  и, соответственно, к большому размеру  $w$  разрешимого элемента в наблюдаемом изображении), состоит в применении принципа временного интегрирования (см., например, [41]), позволяющего получать в случае когерентного накопления в пространстве регистрации выходной функции (например, корреляционной функции) размер разрешимого элемента  $w_T \sim \lambda_A / VT_0$ , где  $T_0$  - полная длина сигнала, вводимого в АОМ,  $V$  - скорость акустической волны. Поскольку величина  $VT_0$  в принципе может существенно превосходить  $D_0$ , следовательно, разрешимый элемент  $w_T$ , полученный в результате когерентного накопления, может быть существенно меньше «классического» элемента разрешения  $w_D$ . Вопрос состоит в возможности распространения этого принципа на случай наблюдения голографического изображения, и позитивным теоретическим моментом здесь является то обстоятельство, что восстанавливаемые с голограммы элементарные волны являются взаимно когерентными, и поэтому можно исследовать возможность служения их в качестве взаимных обобщенных опорных пучков для реализации искомого когерентного накопления в итоговом изображении.

Одноканальные (одиночные) объемные АОМ характеризуются, как правило, более высокими допустимыми полосами рабочих частот входного электрического сигнала по сравнению с многоканальными АОМ. Поэтому не исключена возможность применения для голографического отображения двух и более взаимно ортогональных одноканальных АОМ с применением комбинации принципов пространственного и временного интегрирования (см. рис. 22 в [3]); при этом в качестве временного интегратора может выступать как непосредственно среда сетчатки глаза, так и, например, среда фотополимера, в том числе содержащая капсулированный ЖК, которую интенсивно исследуют в настоящее время теоретически и экспериментально в качестве реверсивной оптически адресуемой голографической среды [42-44].

Возможно, интересным было бы исследование возможности реализации многоканального ввода в АОМ двух взаимно ортогональных систем ультразвуковых «лучей» с целью получения произвольной ориентации аналогов интерференционной полос, как это имеет место при оптической записи последних, с целью расширения функциональных возможностей получаемого аналога голографической записи (при использовании единого направления распространения всех ультразвуковых «лучей», как это имеет место в традиционном многоканальном АОМ, нельзя получить произвольную ориентацию результирующих пространственных изменений показателя преломления АОМ, играющих роль аналога интерференционных полос).

Достоинством АОМ на ПАВ является возможность получения очень больших значений эффективности акустооптического взаимодействия из-за высокой концентрации энергии взаимодействующих оптической и акустических волн в тонком (поверхностном) слое (который может быть и волноводным), что позволяет существенно снизить потребляемую мощность при вводе электрических сигналов. Расширение полосы рабочих частот АОМ на ПАВ можно получить применением составных встречно-штыревых преобразователей, однако неясно, достаточно ли будет даже расширенной таким образом частотной полосы для реализации голографического изображения с разрешением, достаточным для реализации конкурентноспособных голографических дисплеев.

Нет оснований говорить о неразрешимости указанных проблем, однако пока нет никакой определенности в сроках возможного их решения с целью реального практического применения.

### 8.3. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ ДИСПЛЕИ

Подкласс «стереоскопические дисплеи» является уже сейчас практическим вариантом выбора для решения подавляющего большинства современных задач объемного отображения. Хотя здесь непросто реализовывать технические решения, которые не приводят к утомляемости зрения, но все же этот подкласс уже имеет все необходимое технологическое и информационное обеспечение для получения комфортного информативного стереоотображения.

В обозримом будущем можно ожидать развития следующих направлений и методов стереоскопического отображения:

- бытовые системы объемного отображения будут реализовываться преимущественно в вариантах со стереочка-ми, обеспечивающих приемлемую стоимость при достаточном качестве объемного отображения с возможностью одновременного просмотра многими зрителями одновременно, например, следует ожидать появления серийно-выпускаемых бытовых стереоскопических 100 Гц телевизоров, а также недорогих DLP-видеопроекторов, позволяю-

щих реализовать формат «попеременная стереопара» с кадровой частотой 100-120 Гц в домашних и презентационных стереоскопических видеотеатрах,

- существенное развитие практических аппаратных и программных автоматических и полуавтоматических (с участием оператора) квазистереоскопических методов с целью 2Д-3Д стерео конверсии моноскопических видеофильмов и телепередач,

- безочковые компьютерные дисплеи прямого наблюдения и проекционного типа будут развиваться на основе потребностей преимущественно корпоративного сектора рынка, при этом:

- принципы функционирования селективной оптики (предназначенной для формирования пространственно-разделенных зон наблюдения для изображения, вводимого в виде двумерных матричных стереопар) будут в совокупности все более приближаться к принципам работы объемной голограммы (комбинирование амплитудной, спектральной и угловой селекции светового потока изображения),

- всестороннее исследование вычислительных методов формирования ракурсов с целью реализации многокурсорности и согласования аккомодации с конвергенцией, в том числе в сочетании с применением взаимно-сопряженных дисплеев, одна группа которых действует как адаптивная селективная маска к другой группе (в качестве альтернативы традиционной, с заданной конфигурацией, селективной оптике).

В качестве простого оригинального варианта согласования аккомодации и конвергенции для некоторых задач можно рассмотреть принцип «множественной» камеры-обскуры как в объектной, так и в пространственно-спектральной математических областях. Одиночная камера-обкура (точечное отверстие в светонепроницаемой перегородке) является, как известно, простейшим устройством для безлинзового формирования изображения (на некотором экране, размещенном на определенном расстоянии от отверстия). Если на пути светового потока, идущего от стереоскопического дисплея, использовать множество таких отверстий в светонепроницаемой перегородках, помещенных перед двумя глазами наблюдателя, то наблюдатель будет воспринимать стереоизображение в условиях, когда линза-хрусталик с ее фокусирующими свойствами фактически не используется как объектив, т.е. аккомодация будет фактически выключена, и перестанет конфликтовать с конвергенцией. Автором наблюдалось стереоизображение с очень близко расположенного компьютерного дисплея через «дырчатые» очки, совмещенные со стереоочками, и при этом субъективно напряжение зрения существенно уменьшалось по сравнению со случаем применения только стереоочков. Однако практическая ценность такого метода зависит от того, можно ли в принципе избавиться от фрагментарности наблюдаемой трехмерной сцены, которая была визуально поделена на множество фрагментов с размытыми краями, соответствующих действию отверстий на световой поток изображения. Для устранения фрагментарности можно пробовать варьирование параметров отверстий, оставаясь в объектной области, либо перейти в спектральную область и построить пространственно-спектральный аналог множественной камеры-обскуры (например, в виде толсто-слоистой голограммы углового спектра плоских или сферических волн, являющихся дифракционным образом множества точечных отверстий).

## 9. ВЫВОДЫ

В целом следует констатировать, что по причине крайней сложности механизма восприятия человеком трехмерных сцен весьма проблематична в обозримом будущем реализация такого универсального трехмерного дисплея, который позволил бы воспроизводить во всей полноте объемный (трехмерный) оптический образ сцены, воспринимаемый всеми существенными факторами человеческого зрения как практически неотличимый от образа натуральной сцены для произвольной задачи трехмерного отображения.

Поэтому на современном этапе постановка такой общей задачи не имеет смысла. Отсутствие радикально новых решений в данной сфере в течение последних 50-60 лет (со времен изобретения голографии) является мотивацией для продолжения поиска новых решений в основном через эволюционное развитие перспективных подклассов трехмерных дисплеев. Такой эволюционный процесс позволяет в сложившейся ситуации не только успешно решать разнообразные текущие практические задачи объемного отображения, но и создавать реальный фундамент сферы объемного отображения, увеличивающий вероятность появления кардинально новых решений, которые не сводятся к линейным комбинациям решений из рассмотренных подклассов.

Безусловным лидером по созданию такого фундамента является в настоящее время подкласс «стереоскопические дисплеи», существующий уровень технических решений которого достаточен для решения подавляющего числа современных задач объемного отображения. Все остальные подклассы трехмерных дисплеев, к сожалению, неопределенно долгое время не могут быть реализованы в конкурентноспособных вариантах в силу серьезности препятствующих этому научно-технических проблем, хотя это и не исключает применение решений из данных классов уже сейчас к каким-либо частным задачам объемного отображения.

Для ускорения как прогресса рассмотренных перспективных классов технических решений, так и процесса возможного появления кардинально новых решений весьма актуально также дальнейшее развитие и отбор действительно фундаментальных направлений исследований в таких областях технической физики, как пространственно-временная модуляция света и методы формирования изображений.

Для технической физики, естественно, под фундаментальными исследованиями можно понимать только такие исследования, которые дают в итоге реальный практический вклад в фундамент той технической сферы, которой эта область физики служит.

---

Автор признателен С. А. Студенцову за полезные обсуждения физического механизма работы ЖК ячеек.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасов Л.В., Ежов В.А. Когерентнооптическая обработка радиосигналов. – Зарубежная электроника, 1980, № 2, с. 3-36.
2. Ezhov V.A., Studentsov S.A. Volume (or stereoscopic) images on the screens of standard computer and television displays. – Proc. SPIE, 2005, v.5821, pp.102-116.
3. Ежов В.А., Тарасов Л.В. Акустооптическая обработка радиосигналов. – Зарубежная радиоэлектроника, 1982, № 7, с. 3-35.
4. Bos Ph.J. Rapid starting, high-speed liquid crystal variable optical retarder. – Патент США № 4566758, G02F1/13, опубл. 28.01.86.
5. Компанец И.Н. Нематические кристаллы в оптоэлектронных устройствах. – М., 1973, Автореферат диссертации (ФИАН), с.12.
6. Van Doorn. Transient behaviour of twited nematic liquid crystal layer in an electric field. – Journal de physique, 1975, v.36, pp.C1/C261-C1/C263.
7. Boyd G.D., Cheng J., Ngo P.D. Mechanically multistable liquid crystal cell. – Патент США № 4333708, G02F 1/133, опубл. 08.01.82.

8. Lipton L., Berman A., Meyer L. Achromatic liquid crystal shutter for stereoscopic and other applications. - Патент США № 4884876, G02F 1/13, опублик. 05.12.89.
9. Bos P.J. High contrast light shutter system. - Патент США № 5187603, G02F 1/13, опублик. 16.02.93.
10. Haven T.J. A liquid-crystal video stereoscope with high extinction ratios, a 28% transmission state, and one-hundred-microsecond switching. - Proc. SPIE, 1987, v.761, pp.23-26.
11. Lipton L., Berman A., Meyer L. et al. Method and system employing a pus-pull liquid crystal modulator. - Патент США № 4792850, H04N 13/04, опублик. 20.12.88.
12. Брежнев В.А., Ежов В.А., Симоненко Г.В., Студенцов С.А. Пассивно-матричный ЖК экран и способ управления данным экраном. - PCT/RU01/00492, G02F 1/133, G09G 3/36, дата приоритета 24.04.2001.
13. Ежов В.А., Зарецкий П.Н., Семочкин П.Н. Телевизионное устройство для демонстрации стереоскопических изображений. - Патент СССР № 1715179, H04N 15/00, дата приоритета 09.11.89.
14. Green G.S. - Method and apparatus for producing stereoscopic images. - Патент США № 4641178, H04N 15/00, опублик. 03.02.87
15. Ежов В.А., Зарецкий П.Н., Семочкин П.Н. Телевизионное устройство для воспроизведения стереоскопических изображений. - PCT/RU01/00240, H04N 15/00, дата приоритета 06.11.90.
16. Woodgate G.J., Harrold J. High efficiency reconfigurable 2D/3D autostereoscopic display. - SID 2003 Digest, pp. 394-397.
17. Tzschoppe W. Arrangement for two-dimensional or three-dimensional representation. - PCT 2004/057878, H04N 13/00, опублик. 08.07.2004.
18. Tzschoppe W. Arrangement for realizing three-dimensional representation. - PCT 2004/098203, H04N 13/00, опублик. 11.11.2004.
19. Путилин А.Н. - System and method for visualization of stereo and multi aspect images. Патент США № 67171628, G02B 27/22, опублик. 06.04.2004.
20. Путилин А.Н., Лукьяница А.А. - Three-dimensional image projection employing retro-reflecting screens. - Патент США № 6843564, G03B 21/00, опублик. 18.01.2005.
21. Ежов В.А. Реалистичное квазистереоизображение на экранах обычных компьютеров и телевизоров. - Киномеханик, 2002, № 9, с.22-28.
22. Ежов В.А. Способ и устройство (его варианты) для получения объемного изображения. - Патент РФ № 2202860, H04N 15/00, приоритет от 08.06.2001, опублик.20.04.2003.
23. Iinuma T., Murata H., Yamashita S. Natural stereo depth creation methodology for a real-time 2D-to-3D image conversion. - SID 2000 Digest, pp.1212-1215.
24. Ежов В.А. Объемное изображение на экранах обычных компьютеров и телевизоров. - Электронные компоненты, 2003, № 3, с.80-81.
25. Kaye M.C., Best Ch.J., Haynes R.R. Method and system for creating realistic smooth three-dimensional depth contours from two-dimensional images. - Патент США № 6515659, G06T 15/00, опублик. 04.02.2003.
26. Kaye M.C. System and method for dimensionalization processing of images in consideration of a predetermined image projection format. - Патент США № 6208348, G06T 15/00, опублик. 27.03.2001.
27. Kaye M.C. Image processing system and method for converting two-dimensional images into three-dimensional images. - Патент США № 6686926, G06T 15/00, опублик. 03.02.2004.
28. Арсенич С.И. Projection system. - Патент США № 6761459, G03B 22/00, опублик.13.07.2004.
29. Комар В.Г., Сон Д.Ю., Сабо С.А., Майоров В.П. и др. - Телевизионная система с наблюдением объемного цветного изображения... - Техника кино и телевидения, 1998, № 4.
30. Son J.Y., Smirnov V.V., Novoselsky V.V. - Патент США № 6178043, G02B 27/22, опублик. 23.01.2001.
31. Bobrinev V., Son J., Kim S. et al. - Analysis of color distortion in a transmission-type holographic screen - Applied Optics., 2005, v.44, № 15, pp. 2943-2948.
32. Hines S.P. Infinity display apparatus using cylindrical beam-splitters. - Патент США № 4653875, G02B 17/00, опублик. 31.03.87.
33. Kim K., Siegel M., Son J. и др. Synthesis of a high-resolution 3D-stereoscopic image pair from a high-resolution monoscopic image and a low-resolution depth map. - Proc. SPIE vol. 3295A, 1998, pp.78-86.
34. Suehiro K., Nakamura H., Yamada K. et al. Integral 3D imaging system using monocular 2D video and depth data. - Proc. SPIE, 2005, v.5664, pp.230-240.
35. Sallivan A. A solid-state multiplanar volumetric display. - SID 2003 Digest, pp.1531-1533.
36. Компанетс И.Н., Гончуков С.А. Volumetric 3-D liquid-crystal displays. - Information Display, 2004, № 5, pp. 2-4.
37. Onural L., Bozdagi G., Atalar A. New approach to holographic video imaging: principles and simulation. - Proc. SPIE, 1992, v.1667, pp.63-72.
38. Петров В.В. 3D holographic video image forming by acousto-optical method. - Journal of the SID., 2005, v.13, № 4, pp. 335-338.
39. Michalkiewicz A., Kujawinska M., Kozacki T. et al. Holographic three-dimensional displays with liquid crystal on silicon spatial light modulators. - Proc. SPIE, 2004, v. 5531, pp. 5531.
40. Sallivan A.A. Multiplanar volumetric display system and method of operation using three-dimensional anti-aliasing. - Патент США № 6377229, G09G 5/00, опублик. 23.04.2002.
41. Eichenlaub J.B. Optical system which projects small volumetric images to very large size. - Proc. SPIE, 2005, v.5664, pp. 313-322.
42. Date M., Takeuchi Y., Tanaka K. et al. - Full-color reflective display device using holographically fabricated polymer-dispersed liquid crystal. - Journal of the SID., 1999, v.7, № 1, pp. 17-22.
43. Gallego S., Ortufio M., Neipp C. 3 Dimensional analysis of holographic photopolimer based memories. - Optics Express, 2005, v.13, № 9, pp. 3543-35557.
44. Sutehrland R., Natarajan L., Tondiglia V. - Switchable volume hologram materials and devices - Патент США № 6878494, G02B 5/32, опублик. 12.05.2005.

#### ПРИМЕЧАНИЕ

- 1) Не рекомендуется использовать получивший незаслуженно широкое распространение термин "псевдостереоскопическое изображение" из-за нежелательной аналогии с "псевдоскопическими" изображениями, имеющими место в сфере голографии, и являющимися принципиально ложными (инверсными по глубине, как бы "вывернутыми наизнанку").