

Мир Кино

ТЕХНИКИ

ОКТАБРЬ–ДЕКАБРЬ | 4(30)-2013 |

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ | ОАО «НИКФИ» | ООО «ИПП «Куна» | Подписной индекс: 81923 в каталоге Роспечати



**ЦВЕТНЫЕ
ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ,
ИМПУЛЬСНЫЕ
И ЦИФРОВЫЕ
ГОЛОГРАММЫ
НА НОВОМ
ГОЛОГРАФИЧЕСКОМ
МАТЕРИАЛЕ U-04**

**СВИДЕТЕЛЬСТВА
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
КАРТ ГЛУБИНЫ
В СИСТЕМЕ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО
ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА**

**ТРЕХМЕРНОЕ
ВИДЕО
С КОНТИНУАЛЬНЫМ
РАКУРСОМ:
СЪЁМКА, МОДЕЛЬ
И ОТОБРАЖЕНИЕ**

**IMAX 3D-
ЛЕГЕНДА СТЕРЕОКИНО**

**110 лет со дня рождения
П.Г. ТАГЕРА,
СОЗДАТЕЛЯ ЗВУКОВОГО КИНЕМАТОГРАФА**

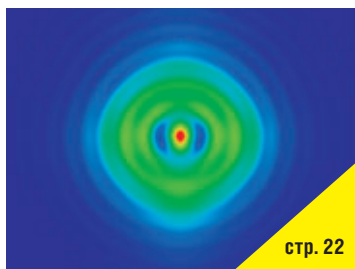
№ 30 СОДЕРЖАНИЕ



стр. 5



стр. 13



стр. 22



стр. 38

Юбилей, знаменательные даты

110 лет со дня рождения П.Г. Тагера

2

Доклады

И. Женте, М.К. Шевцов

Цветные отражательные, импульсные и цифровые голограммы на новом голографическом материале U-04

5

Технологии

С. Захаровас, Р. Баканас, Д. Адлене, Р. Шеперис, П. Нармонтас

Использование импульсного лазера для записи мастер-голограмм на фоторезисте

7

Г.И. Рожкова, С.В. Алексеенко

Свидетельства использования карт глубины в системе пространственного зрения человека

13

С.Б. Бирючинский

Проекционные оптические системы для литографии

22

А.С. Михайлов, М.А. Сакварелидзе, Д.И. Толкунов

Сравнительные испытания свойств пищевого и инертного фотографического желатина

27

Мастер-класс, семинары, новости smpte, отзывы

А. Жирков, А. Путилин

Трёхмерное видео с континуальным ракурсом: съёмка, модель и отображение

32

Страницы истории кино

А.С. Мелкумов

IMAX 3D – легенда стереокино

38

Требования для публикации научных статей в журнале «МИР ТЕХНИКИ КИНО»

1. Статья представляется на электронном носителе, либо по почте Kevin@paradiz.ru, объёмом не более 40 000 знаков.
2. Рисунки должны быть отдельно в JPG или TIF с разрешением не менее 300 dpi.
3. Статьи должны содержать (на русском и английском языках):
 - название;
 - аннотацию (краткую);
 - ключевые слова.
4. С авторами заключается лицензионное соглашение на публикацию.
5. Плата с аспирантов за публикацию не взимается.

Электронная версия www.elibrary.ru

Подписной индекс Роспечать: № 81923

Научно-технический журнал «Мир Техники Кино»
Выходит 4 раза в год
Издатель: ООО «ИПП «КУНА»
Учредители: ОАО «НИКФИ», ООО «ИПП «КУНА»
при поддержке Министерства культуры Российской Федерации

Руководитель проекта:
Костылев Олег Юрьевич
Главный редактор:
Индлин Юрий Александрович, к.т.н.
Выпускающий редактор:
Захарова Тамара Владимировна
Арт-директор, оформление обложки:
Шишкин Владимир Геннадьевич
Вёрстка и дизайн:
Аверина Наталия Владимировна
Корректор:
Сайкина Наталья Владимировна

Редакционный совет:
Комар В.Г., проф., д.т.н., ОАО «НИКФИ»
Белоусов А.А., проф., д.т.н., СПбГУКИТ
Тихомирова Г.В., проф., д.т.н., СПбГУКИТ
Сакварелидзе М.А., д.х.н.
Тимофеев А.Е., к.т.н., ОАО «НИКФИ»
Перегудов А.Ф., к.т.н., СПбГУКИТ
Блохин А.С., к.т.н., ОАО «НИКФИ»
Барский И.Д., к.т.н., ВГИК
Одинокос С.Б., д.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Раев О.Н., к.т.н., МКБК
Волков А.С., к.т.н., ОАО «НИКФИ»

Отпечатано в ООО «ИПП «КУНА»
Объём 5,5 п.л. Заказ № 125966.
Тираж 1000 экземпляров.

Свидетельство о регистрации
СМИ-ПИ № ФС77-28384 от 23 мая 2007 года.

Перепечатка материалов осуществляется только с разрешения редакции, ссылка на журнал обязательна. Редакция не несёт ответственности за достоверность сведений о рекламе и объявлениях. Мнение редакции и рецензентов не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.

www.mtk-magazine.ru, e-mail: kevin@paradiz.ru
телефон (факс): +7 (495) 795-02-99, 795-02-97



РАДИОПРЯТАТОР СВЯТА

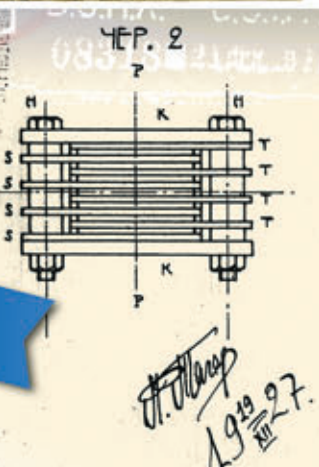
Ходит по ВИАУ Изобретений ВСХ СССР.
 24/12 1927

Франшиза: Патер Павел
 Франшиза: Советов.
 Прогресс: Бизик.
 Троихвотуно: Москва-Центр. Со
 мнов 08

Заявлено.

С.С.С.Р.-Б.
 24.ДЕК.1927
 КОМИТЕТ по ДЕЛАМ ИЗОБРЕ

Представил при сем нижеперечисленные
 документы, прошу выдать мне патент на
 мое изобретение: решетчатый loudspeaker
 света.



П. Павлов
1929
№ 27.

1 октября 2013 года исполнилось

110 лет

**со дня рождения выдающегося учёного,
одного из основоположников звукового
кинематографа,
доктора технических наук, профессора,
Заслуженного деятеля науки и техники**

ПАВЛА ГРИГОРЬЕВИЧА ТАГЕРА

ВКЛАД В НАУКУ И ТЕХНИКУ

**Павел Григорьевич Тагер (1.10.1903, Москва – 30.06.1971, Москва) –
изобретатель советской звуковой киносистемы «ТАГЕФОН»**

26 ноября 1926 года считается «днём рождения» советского звукового кино. В этот день в Научно-исследовательском институте физики и кристаллографии при Московском университете впервые П.Г. Тагер сделал доклад о начале работ над «Говорящим кино».

Оригинальная система звукового кино была предложена П.Г. Тагером, когда в мире не было ни одного звукового кинотеатра (один кинотеатр в Нью-Йорке работал по граммофонной системе). А через два месяца, 17 января 1927 г. была подана первая заявка на Авторское свидетельство.

В марте 1928 года П.Г. Тагер в Москве проводит первую публичную демонстрацию воспроизведения звука по разработанной им системе «Тагелефон». За пять лет, с 1927 по 1932 год, он получил 15 авторских свидетельств и патентов за разработки в области записи звука. Авторским свидетельством № 23638 П.Г. Тагер был признан изобретателем системы звукового кино с продольным расположением кадров на киноплёнке, что позднее нашло применение в стереофонии. (В США эта система была осуществлена только в 1954 г. под названием «ВИСТАВИЖН»).

Павел Григорьевич Тагер – автор первой советской системы передачи по радио звукозаписи на плёнке («ТОН-ФИЛЬМ»), которая состоялась в радиозфире 26 октября 1929 года.

В марте 1930 г. под его руководством приступили к созданию первой в СССР кинофабрики «Рот-Фронт» в Москве, рассчитанной на производство звуковых кинокартин. В ноябре этого же года сдали в эксплуатацию два крупнейших звуковых кинотеатра – «Колосс» (Большой зал консерватории) в Москве и «Гигант» в Ленинграде.

В 1930 году при его непосредственном участии на заводах Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности было впервые освоено СЕРИЙНОЕ производство звуковых кинопроекторных аппаратов «Тагелефон ПГК-4», а в 1931 г. на Ленинградском заводе киноаппаратуры начался СЕРИЙНЫЙ выпуск звукозаписывающей аппаратуры «Тагелефон СГК-7».

В этом же году при его непосредственном участии и руководстве начались работы по широкому внедрению разработок в промышленность: серийное производство звуковой аппаратуры, внедрение новых методов производства звуковых кинофильмов, а также массовое переоборудование старых немых кинотеатров в звуковые. На базе комплекса этих работ началось также широкое внедрение электроники в практику.

В первой половине 1931 г. на аппаратуре «Тагелефон» были закончены съёмки первого советского полнометражного художественного кинофильма «Путёвка в жизнь», который с огромным успехом в течение нескольких лет демонстрировался в СССР и на экранах многих стран мира.

В 1933–1938 гг. П. Г. Тагер руководил работами по кинофикации и фотофикации так и не построенного Дворца Советов. В 1936–1937 гг. П. Г. разработал стереофоническую аппаратуру с использованием специальной ячейки КЕРРА (в США аналогичные работы были опубликованы в 1946 г.). В 1937 г. П. Г. Тагер опубликовал монографию «Ячейка Керра», в которой разработал теоретические основы электрооптической модуляции света с квадратическим эффектом. Эта монография в области электрооптики является классической и в настоящее время.

В 1936 г. Тагером П. Г. впервые были начаты работы по системе звукозаписи с противофазной фонограммой двойной ширины, получившей позднее применение в записи звука. В этом же году Павлом Григорьевичем впервые в СССР начаты работы по созданию больших приёмных телевизионных экранов, что в настоящее время является каждодневной реальностью. По этим работам была написана монография (30 печатных листов), подготовлена её вёрстка, но война прервала выпуск тиража (в ЦГАЛИ имеется вёрстка этой основополагающей монографии). В этом же году проводились работы по электронным коммутаторам (впервые в СССР).

В 1938 году впервые Павел Григорьевич начал экспериментальные работы по созданию аппаратуры для записи телевизионных изображений с экрана кинескопа методом быстрого продергивания плёнки, в 1939 г. впервые в СССР осуществил киносъёмку телевизионных изображений с экрана кинескопа методом конверсии частоты кадров.

В 1939 г. П. Г. Тагер впервые разработал и предложил систему (под названием «Радиомаяк») радионавигации (радиолокации), рукопись монографии также хранится в ЦГАЛИ. В 1939–1940 гг. впервые разработал радиографическую аппаратуру «Радиограф», и 16 января 1941 года успешно осуществил опыт фототелевизионного изображения с экрана радиостанции РВ-49 им. ВЦСПС.

В годы войны П. Г. Тагер (с 1941 по 1946) руководил и осуществлял работы в АН СССР и других закрытых организациях по вопросам вооружения. По военной тематике написал несколько монографий и ряд статей (в закрытой печати). В эти годы П. Г. Тагер делает несколько важных изобретений в военной сфере, в том числе, принимает участие в разработке новой формы снаряда с увеличенной пробивной силой.

Павлу Григорьевичу Тагеру принадлежат первые разработки в области отечественного стереофонического кинематографа, начатые им ещё в 1937 году и продолженные в НИКФИ в 1948–1949 годах и заложившие теоретические основы для стереофонической записи-воспроизведения звука в 1960-е годы. Именно в эти годы под его руководством была разработана аппаратура для съёмки и показа широкоэкранный стереофонического фильма с кашетированным кадром. Результатом этих работ в 1949 году стала первая экспериментальная

демонстрация широкоэкранный фильма с кашетированным кадром и стереофоническим звуком по системе П. Г. Тагера.

В 50-е годы он руководит теоретическими и практическими работами по развитию магнитной видеозаписи. В 1958 году на Всемирной выставке в Брюсселе П. Г. Тагер был награждён дипломом Grand Prix.

В 60-е годы, вернувшись к перспективному направлению по стереофоническому кинематографу, разработал основополагающие теоретические физические основы стереофонии, которые опубликовал в отечественной и зарубежной печати (свыше 25 оригинальных статей).

Научные и технические основы советского звукового кино явились толчком к дальнейшему прогрессу ряда смежных отраслей промышленности, в том числе, электроники. Неоценимо оказалось влияние звукового кино на развитие теории и практики электрооптики, электроакустики, архитектурной акустики, радиовещания и телевидения. Как только появилось телевидение, П. Г. Тагер увидел перспективу органической связи кинематографа с телевидением, вопреки мнению очень многих специалистов, особенно на Западе, ошибочно предрекавших гибель кино в борьбе с телевидением.

Павел Григорьевич – автор более 50 оригинальных изобретений, 90 опубликованных работ (научных статей, закрытых и открытых монографий), более 130 популярных статей, выступлений на конференциях, в массовых журналах и газетах, его имя и ссылки на научные труды десятки раз упоминаются в печати.

Тагер П. Г. был редактором более 10 книг, оппонировал более тридцати докторских и кандидатских диссертаций, являлся руководителем или членом многих научных и технических советов и секций, долгие годы членом Высшей Аттестационной Комиссии (ВАК) Министерства высшего образования СССР, одним из основателей Института автоматики и телемеханики АН СССР (1939 г.).

Павел Григорьевич Тагер обладал редким талантом предвидения нового, и его главные научно-технические разработки осуществлялись впервые. Он добивался выдающихся достижений не только потому, что имел фундаментальное образование (окончил два факультета МГУ: физико-математический в 1926 г. и механический – в 1929) – он был очень талантливым человеком и необыкновенно трудолюбив. Павел Григорьевич обладал ещё замечательным и очень важным качеством настоящего учёного – беззаветной преданностью науке.

Архив Павла Григорьевича Тагера хранится в ЦГАЛИ (г. Москва) – рукописи неопубликованных научных работ и монографий, а также в SFU (Словенский институт кинематографии, отдел документации, г. Братислава, Словакия) – основные опубликованные научные труды и книги, авторские свидетельства, фотографии первых звуковых устройств и аппаратов, статьи и периодика о П. Г. Тагере, дипломы и награды. ■



ЦВЕТНЫЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ, ИМПУЛЬСНЫЕ И ЦИФРОВЫЕ ГОЛОГРАММЫ на новом голографическом материале U-04

(Доклад на 10-ой Международной конференции «ГолоЭкспо»,
17–18 сентября 2013, г. Москва)



■ И. Женте, Голографическое ателье Ива Женте, Бордо, Франция;
М.К. Шевцов, ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», С-Петербург, Россия

■ Фотопластинки «Ultimate-08», презентация которых прошла в Австрии 13 лет назад [1], получили широкое распространение для записи голограмм в школах и университетах благодаря высокой чувствительности (порядка 200 мДж/см² в красной области спектра), что позволяет использовать гелий-неоновый лазер, а также простоте обработки: проявление и отбелка в безопасных растворах. При этом голограммы получаются достаточно яркими, а шум практически отсутствует.

За последние годы в результате контроля и анализа всех стадий производства сделаны определённые шаги по совершенствованию процесса полива фотоматериалов. Во-первых, введена в строй специально сконструированная моющая машина для пластинок размером до 60x80 см, которая позволяет подготовить поверхность для прямого полива эмульсии без предварительного нанесения подслоя. Ряд улучшений поливочной машины позволил получать более равномерный полив слоя как

на пластинках, так и на триацетатной плёнке. Постоянно производятся тесты новых красителей, как по отдельности, так и в различных комбинациях, с целью повышения чувствительности на длинах волн новых лазеров, а также повышения стабильности материала. Например, повышена чувствительность материала для длины волны 660 нм, как для непрерывных, так и для импульсных лазеров; для непрерывного лазера на длине волны 670 нм и других длин волн лазеров, которые появились на рынке.

После объявления в 2010 году [2] о начале продаж панхроматического материала U-08 в течение последующих трёх лет количество проданных фотопластинок непрерывно росло и в 2013 году превысило количество проданных монохромных. Это говорит о тенденциях развития рынка голографических материалов. Изопанхроматический материал U-08 обладает высокой чувствительностью: для наиболее распространённых лазеров (640/532/457 нм) достаточно иметь

120 мДж/см² для каждого цвета. Если сравнить с фотополимерным материалом, который сейчас появился на рынке, то его чувствительность составляет десятки мДж, поэтому можно считать, что галогенидосеребряные материалы будут широко использоваться, минимум, 10 лет.

Несколько компаний работают над перспективными проектами, ориентируясь на наш материал в ближайшем будущем, что заставляет нас постоянно работать над его улучшением, а критические отзывы о работе с ним позволяют определить пути дальнейшего развития.

Прогресс в дальнейшем повышении качества цветных голографических изображений во многом связан с развитием регистрирующих сред. Одной из важнейших характеристик качества голограмм Денисюка является уровень шума, т.е. уровень рассеяния падающего на голограмму света при восстановлении, не участвующего в процессе построения изображения. Особенно остро этот вопрос стоит для цветных голограмм, при записи которых используется весь спектральный диапазон, включая вносящую наибольший вклад синюю область спектра (440–480 нм). Снижение уровня рассеяния достигается уменьшением размеров микрокристаллов серебра, однако при этом снижается общая чувствительность материала. В результате экспериментов, продолжающихся в течение последних пяти лет, удалось найти новый процесс приготовления эмульсии, названной «Ultimate U-04».

Этот материал создан не только для цветной голографии, но и для записи голограммных оптических элементов (ГОЭ), поскольку он, по сравнению с материалом U-08, обладает улучшенными параметрами:

- снижен уровень рассеянного света в восстановленном изображении. Этот уровень был достаточно низким

и для U-08, но некоторые применения ГОЭ требуют ещё меньшего рассеяния;

- повышена разрешающая способность. Когда запись происходит на трёх длинах волн, то почти не наблюдается уменьшения ДЭ при наложении экспозиций;

- повышена ДЭ голограмм Денисюка в глубоком синем диапазоне. Ранее голограммы в синем свете не были настолько яркими и насыщенными, как в красном и зелёном, теперь одинаковы;

- общее повышение ДЭ для всех длин волн для достижения качества мастер-голограммы, как для аналоговых, так и цифровых голограмм.

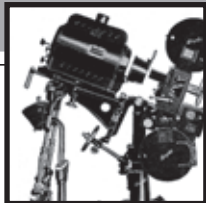
Все указанные параметры, в основном, связаны с одним и тем же производственным фактором – размером зёрен фотографической эмульсии. Изготовив эмульсию с более мелким размером зёрен, удалось решить перечисленные выше проблемы, однако чувствительность при этом уменьшилась примерно в 2,5 раза. Компенсировать падение чувствительности удалось за счёт увеличения мощности всех трёх лазеров нашей мобильной камеры с 25 до 100 мВт, что в результате даже снизило время экспозиции. Оценить качество изображения можно по голограмме объекта, имеющего преимущественно сине-голубой цвет. О минимальном уровне рассеяния говорит тот факт, что отсутствует разница в шуме при восстановлении цветной голограммы галогенной лампой и светодиодным источником с соответствующим набором светодиодов в красной, зелёной и синей области спектра, в отличие от голограмм, записанных на фотоматериале «Ultimate-08», особенно в синей части спектра.

Ниже представлены две голограммы, записанные на фотопластинках U-04. ■

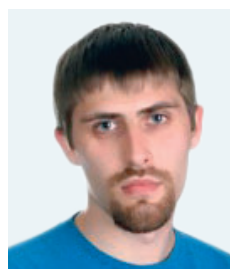


ЛИТЕРАТУРА

1. Philipp Gentet, Yves Gentet. «Proceeding of the conference on display holography Vienna, Austria, 2000».
2. Ив Женте, М.К. Шевцов. Доклад «Запись мастер-голограмм высокого разрешения на голографическом принтере». Труды конференции ГОЛОЭКСПО-2010, Москва.



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА для записи мастер- голограмм на фоторезисте



С. Захаровас, Р. Баканас, ЗАО Геола Дигитал, Каунасский Технологический Университет; Д. Адлене, Р. Шеперис, Каунасский Технологический Университет; П. Нармонтас, Институт материаловедения Каунасского Технологического Университета, Литва

Аннотация

С развитием технологий сегодня появилась возможность использовать голограммы как голографические задники при съёмке кинофильмов и использовать их в театре.

Исследования показали потенциал записи качественных мастер-голограмм одиночными импульсами с коммерчески доступным импульсным лазером на коммерчески доступных фоторезистах, используя, по крайней мере, пятикратно меньшую энергию, чем при экспонировании этих же фоторезистов лазерами постоянного излучения, что открывает возможность применения таких импульсных лазеров для быстрой записи мастер-оригиналов для тиснёных голограмм, как цифровым (ПЗЦГ), так и аналоговым, методами.

Ключевые слова: прямая запись цифровых голограмм, импульсный лазер, фоторезист, мастер-голограмма, экспозиция.

Abstrakt

With the advancement of technology today, the ability to use as a hologram holographic backdrops for shooting movies, and use them in the theater.

Studies have shown the potential of high-quality master recording holograms single pulses with a commercially available pulsed laser commercially available photoresist, using at least five times less energy than when exposed to the same radiation permanent photoresists lasers, which opens the possibility of using pulsed lasers for quick recording master copy for embossed holograms as digital (PZTSG) and analog, methods.

Keywords: direct recording digital holograms, pulsed laser, photoresist, master hologram, exposure.

1. Введение

Прямая запись цифровых голограмм (ПЗЦГ) для изготовления отражательных голограмм была изобретена в 90-тых несколькими исследовательскими группами: Яма-

гучи и др. [1], Клюг и др. (Zebra Imaging, Остин, США) [2], Геола, Литва [3, 4] и была предложена как альтернатива компьютерно-генерируемому голограммам. Работы Геолы также затрагивали и изготовление пропускающих

голограмм, что было далее развито в [5]. Основное преимущество предложенной техники ПЗЦГ заключается в том, что вся поверхность голографического материала разбивается на матрицу маленьких голографических пикселей («голопикселей») [6], каждый из которых представляет собой элементарную голограмму, записываемую при интерференции объектного и опорного пучков лазера постоянного излучения [1, 2] или импульсного лазера [3, 4]. Применение цветного импульсного лазера для ПЗЦГ [7] открыло новые возможности для этого способа записи голограмм.

В настоящее время ПЗЦГ импульсными лазерами применяется коммерчески для изготовления цветных отражательных голограмм большого формата [8,9]. Качество ПЗЦГ, так же как и качество голограмм, изготовленных иными методами, зависит от доступности фотоматериалов на основе галогенидов серебра или фотополимеров, разработка которых проводится постоянно [10, 11, 12]. Для оригинации пропускающих тиснёных голограмм повсеместно используются коммерчески доступные фоторезисты [13]. До сих пор без сомнения предполагалось, что для записи качественных голограмм на фоторезисте необходимо применять излучение постоянного лазера. Однако, как видно из спецификаций изготовителей, чувствительность популярных фоторезистов для постоянного излучения невелика [14, 15] – это требует довольно мощных постоянных лазеров для записи мастер-оригиналов. Неизвестно ни одного сообщения о взаимодействии импульсного излучения с доступными фоторезистами, кроме нашей предыдущей работы [16], где нами впервые было сообщено о записи голограммы на фоторезисте S1813 толщиной ~10 мкм одиночными импульсами импульсного лазера длиной волны 440 нм и плотностью излучения лишь 8 мДж/см². Длительность импульса лазера при этом составляла 50 нс.

Цель настоящей работы – исследовать взаимодействие излучения импульсного лазера с фоторезистами и показать возможность применения импульсных лазеров с меньшей (по сравнению с постоянными лазерами) энергией для быстрой записи мастер-оригиналов для тиснёных голограмм, как цифровым (ПЗЦГ), так и аналоговым, методами.

■ 2. Методы и материалы

2.1. Техника прямой записи цифровых голограмм (ПЗЦГ)

Экспериментальная установка для записи ПЗЦГ на фоторезисте показана на рис. 1 [16]. Лазерное излучение импульсного Nd:YAG лазера длиной волны 440 нм, частотой повторения 30 Гц, длительностью импульса 50 нс и энергией в импульсе 1,5 мДж (1), разделяется

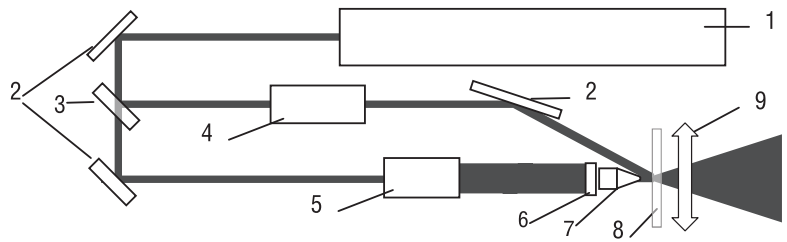


Рис. 1. Экспериментальный принтер Геолы для записи прямой цифровой записи пропускающих голограмм: 1- импульсный лазер BlueBird1, 440 нм, 30 Гц, 50 нс, 1,5 мДж; 2 - зеркала; 3 - делитель; 4 - формирователь опорного пучка; 5 - формирователь объектного пучка; 6 - пространственный модулятор излучения; 7 - объектив; 8 - пластина, покрытая фоторезистом; 9 - направление перемещения стеклянной пластины (эта установка использовалась для импульсной записи тестовых голограмм)

делителем 3 на объектный (O) и опорный (R) пучки. Соответствующие формирователи 4 и 5 приводят оба пучка (O и R) к прямоугольной форме, так, чтобы в месте их интерференции на поверхности фоторезиста была освещена площадь одного голопикселя – квадрат размером 200x200 мкм. Однако, сначала прямоугольный пучок объектного излучения (O) направляется на жидкокристаллический модулятор (SLM) 6. Далее модулированное излучение фокусируется объективом Фурье 7 и интерферирует с опорным пучком на поверхности фоторезиста. Стеклянная пластина 8, покрытая фоторезистом, перемещается с постоянной скоростью в одном из направлений 9. Когда одна линейка голопикселей записана, пластина 8 перемещается на расстояние, равное ширине голопикселя в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка. Следующая линейка голопикселей записывается, перемещая пластину в противоположном направлении. Процесс повторяется до заполнения заданной матрицы голопикселями.

Следует отметить, что голограммы, изготовленные методом ПЗЦГ, являются H2 голограммами, т.е. нет необходимости в изготовлении H1 мастеров. В этом и есть суть нашего метода записи голограммы – для каждого небольшого участка на H2 мы вычисляем, какая информация была бы им «видна» во время классического H1-H2 переноса. Далее мы загружаем эту информацию (ко-



Рис. 2. Изображение, высвечиваемое на жидкокристаллическом модуляторе для записи одного голопикселя ахроматической ПЗЦГ

торая, конечно же, различна для каждого голопикселя) в ЖК модулятор цифрового принтера (детали в [8]). На рис. 4 показано изображение, выводившееся на жидкокристаллический модулятор цифрового принтера.

Следует также отметить, что изображение голопикселя, показанное на рис. 2, приводит к изображению ахроматического белого квадрата, лежащего в плоскости голограммы. При записи заранее рассчитанных изображений голопикселей возможна также запись цветных, либо комбинированных цветных-ахроматических пропускающих голограмм [16].

Проходя через жидкокристаллический модулятор, объектный пучок «вбирает в себя» информацию, высвечиваемую на модуляторе – модулируется. Модулированный пучок затем фокусируется на фотоматериале в квадратный голопиксель. Когда вся заданная площадь фотоматериала покрыта голопикселями, и каждый из них «видел» информацию на жидкокристаллическом модуляторе, идентичную информации, которая «была бы видна» при аналоговом переносе изображения H1-H2, получается цифровая пропускающая изобразительная голограмма. В данном случае это было изображение белого квадрата, лежащее в плоскости голограммы.

2.2. Слой фоторезиста для записи тестовых голограмм

Для записи мастер-голограмм использовались стеклянные пластины, покрытые фоторезистом ma-P1205 и ma-P1225 (производства компании Micro Resist Technology GmbH, Германия) и Shipley S1805 (производства компании Rohm and Haas Electronic Materials Microelectronic Technologies). Некоторые данные о свойствах этих фоторезистов, взятые из соответствующих спецификаций материалов для длины волны излучения 440 нм, приведены в таблице 1.

Фоторезисты наносились на предварительно химически очищенные стеклянные пластины (Soda-lime-silica glass) с применением центрифуги (изготовления Dynapert Precima 14E, Colchester, UK). Скорость вращения центрифуги 2000 об/мин поддерживалась в течение 30 сек. Пластины с нанесённым слоем фоторезиста затем выдерживались 5 минут в печи при температуре 90°C для испарения остатков растворителей и для улучшения адгезии фоторезиста к стеклу. Из-за различной вязкости фоторезистов, толщина слоя у них тоже была разной. Согласно данным производителей фоторези-

стов, толщина слоёв для нашей скорости вращения была следующей: ma-P1205 – 0,67 мкм, ma-P1225 – 3,33 мкм и Shipley S1805 – 0,65 мкм.

Серии тестовых голограмм (изображение белого квадрата в плоскости голограммы размером 1x1 см, размер голопикселя 200x200 мкм) были записаны на различных фоторезистах по технике ПЗЦГ импульсным лазером производства Геола Дигитал, длиной волны 440 нм. Каждый голопиксель записывался одиночным импульсом лазера, при этом суммарная экспозиция составляла $3,3 \div 22,8$ мДж/см², а соотношение объектного и опорного пучков было 1:3,32. Измерение энергии импульсного лазерного излучения производилось измерителем лазерной мощности/энергии NOVAll (Ophir/photronics). Записанные голограммы проявлялись в 1,5% растворе КОН по стандартной процедуре, затем отмывались в деионизированной воде и осушались сжатым азотом.

2.3. Измерение эффективности тестовых голограмм

Дифракционная эффективность тестовых голограмм оценивалась при помощи экспериментальной установки, схема которой приведена на рис. 3. Предлагаемый метод численной оценки качества голограмм основан на том, что голограмма лучшего качества будет обладать большей дифракционной эффективностью из-за более равномерной решётки, сформировавшейся в каждом голопикселе, и более равномерной структуры самого голопикселя.

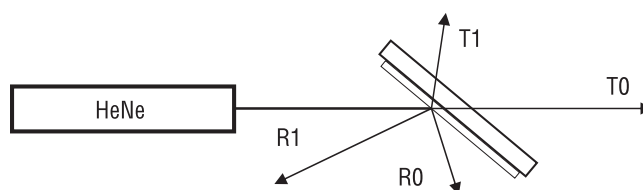


Рис. 3. Экспериментальная установка для оценки дифракционной эффективности тестовых голограмм

Сначала луч He-Ne лазера ($\lambda=632,8$ нм) направлялся на поверхность образца, и угол падения настраивался на угол Брюстера на голограммах, записанных на фоторезисте ma-1205, для получения минимальной интенсивности отражённого поляризованного света в месте измерения. Этот угол сохранялся постоянным, как для ma-1200, так и для S1805. Затем интенсивности 0 и 1 дифракционных максимумов отражённого лазерного света (R0 и R1) измерялись люксметром FLM 400 Data (Geo Fennel). Интенсивности света, прошедшего через образец T0 и T1, не измерялись. Результаты измерений использовались для оценки тестовых ПЗЦГ голограмм, изготовленных при различных экспозициях. Оптический микроскоп ОПТА УМ-301 (увеличение x100) был использован для визуальной оценки тестовых голограмм.

Табл. 1. Оптические свойства фоторезистов серий ma-P1200 и S1800

Фоторезист	Коэффициент поглощения		Коэффициент преломления
	Неэкспонированный	Экспонированный	
ma-P1200 [13]	0,2	0,02	1,65
S1805 [12]	0,27	0,05	1,69

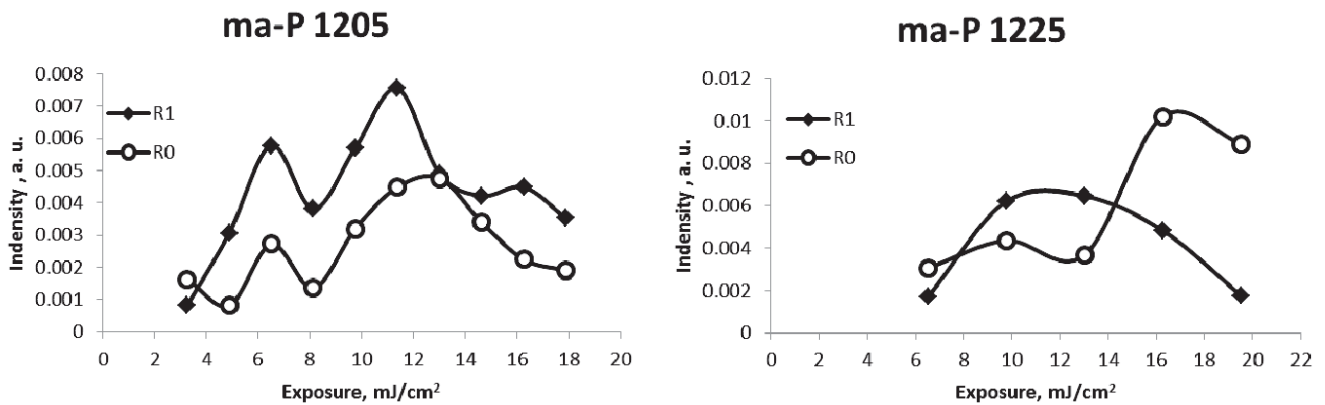


Рис. 4. Изменения дифракционной эффективности (отражённый пучок), измеренные на голограммах, записанных на фоторезисте серии ma-P1200 при различных экспозициях импульсного излучения

3. Результаты

Результаты измерений интенсивности отражённого света, полученные на образцах ПЗЦГ, записанных на фоторезистах серии ma-P1200, приведены на рис. 4. Во избежание погрешности, связанной с нестабильностью лазера, измеренные интенсивности R0 и R1 были нормированные к интенсивности лазера.

Были исследованы 10 тестовых голограмм, записанных на фоторезисте ma-P1205 с различными интенсивностями одиночных импульсов лазерного излучения от 3,3 до 17,9 мДж/см². Было обнаружено, что относительная интенсивность отражённого света R0 и R1 изменялась нелинейно, указывая на различную чувствительность фоторезиста к дозе экспозиции. Наиболее выраженная относительная интенсивность отражённого света R1 – 0,0076 была измерена на тестовой голограмме, записанной при экспозиции 11,4 мДж/см² на фоторезисте ma-P1205 толщиной 0,67 мкм.

Для оценки влияния толщины слоя фоторезиста на требуемую экспозицию были измерены также интенсивности света, отражённого от более толстых голограмм (3,33 мкм), записанных на фоторезисте ma-P1225. Более широкий максимум интенсивности пучка R1 имел наибольшую интенсивность при экспозициях 9,8 и 13 мДж/см² – 0,0062 и 0,0065, соответственно.

Для подтверждения результатов измерения интенсивности дифрагировавшего света были исследованы микроскопические изображения тестовых голограмм, записанных на фоторезисте ma-P1225 при различных экспозициях (рис. 5).

Ясно видно, что голограмма № 1 (6,5 мДж/см²) недоэкспонирована, границы голопикселей очерчены нечётко, и структура голопикселя сформирована недостаточно. Качество голограмм № 2 (9,8 мДж/см²) и №3 (13 мДж/см²) сравнимо по дифракционной эффективности, но структура на голограмме № 3 более ярко выявлена. Перенасыщения области, видимые на голограмме № 4, связаны с излишней экспозицией (16,3 мДж/см²).

Интенсивности первого дифракционного максимума (R1) на фоторезисте Shipley S1805 приведены на рис. 6. Толщина слоя фоторезиста 0,65 мкм. Оказалось, что распределение «экспозиция-интенсивность» ведёт себя так же, как и для голограмм на ma-P1225. Однако, измеренная интенсивность R1 (0,029) для фоторезиста S1805 была в два раза меньше, что связано с недостаточно корректным сведением опорного и объектного пучков (рис. 7). Наблюдается высокая интенсивность пучка R0 от структур, сформированных на S1805. Это связано с геометрией измерений – угол падения пучка лазера был настроен на фоторезисты ma-P1200 и не менялся для S1805. Согласно данным, при-

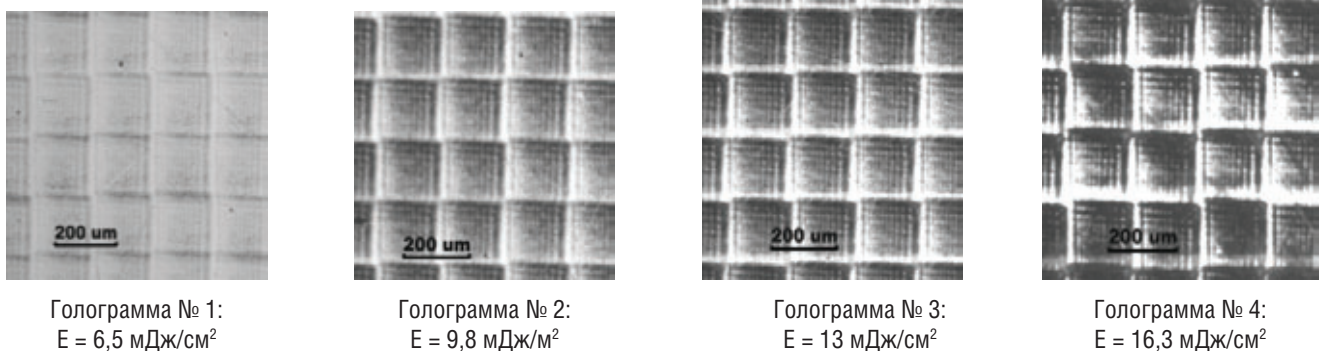


Рис. 5. Микроскопические изображения тестовых голограмм, записанных на фоторезисте ma-P1225 при различных экспозициях импульсного излучения

ведённым в табл. 1, у фоторезистов та-P1200 и S1805 различные коэффициенты преломления и, следовательно, различные углы Брюстера. Однако качественные результаты не вызывают сомнения – наблюдаем чёткий максимум чувствительности фоторезиста к его экспонированию одиночным импульсом импульсного лазера.

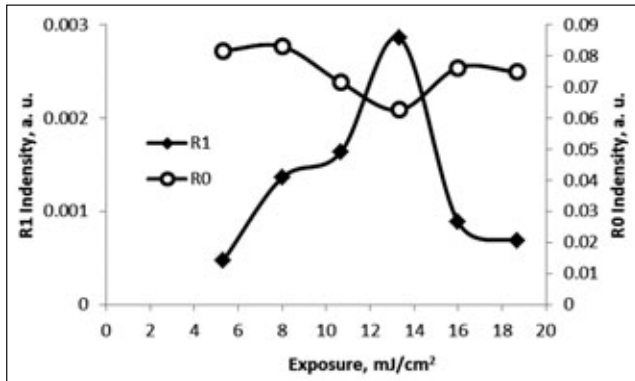
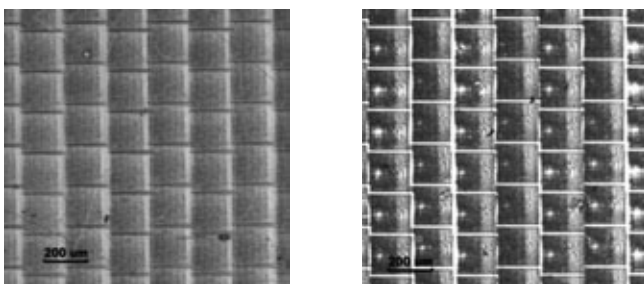


Рис. 6. Изменения интенсивности дифракции (отражённые пучки), измеренные на голограммах, записанных на фоторезисте Shipley S1805 при различных экспозициях импульсным лазером

Визуальная инспекция тестовых голограмм, записанных на фоторезисте Shipley S1805 при различных экспозициях, показала хорошо структурированные голопиксели на голограмме, записанной при экспозиции 13 мДж/см² – рис. 7. Интенсивность пучка R1 этой голограммы тоже была наибольшей. Переэкспозиция более ярко выражена на голограммах, записанных на фоторезисте S1805, что связано с более высоким контрастом этого материала.



Голограмма № 5:
E = 13 мДж/см²

Голограмма № 6:
E = 16,3 мДж/см²

Рис. 7. Микроскопические изображения тестовых голограмм, записанных на фоторезисте та-P1225 при различных экспозициях импульсного излучения

Результаты проведенных исследований показывают, что коммерчески доступные фоторезисты обладают чувствительностью, достаточной для их экспонирования импульсными лазерами небольшой мощности, и могут быть применены для записи высококачественных ПЗЦГ. Технологии, основанные на импульсных лазерах,

требуют меньше времени для записи голограмм, гораздо упрощают стабилизацию схемы записи, а также для их реализации требуется меньшая энергия лазера. Последнее утверждение подтверждается данными производителей фоторезиста. Например, на рис. 8 приведён график чувствительности фоторезистов Shipley серии S1800 [14].

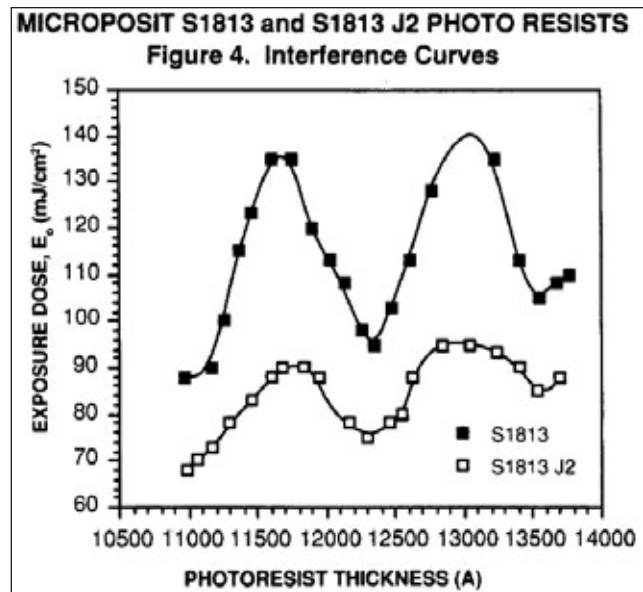


Рис. 8. Фоточувствительность фоторезиста Shipley серии S1800 к постоянному излучению [14]

Возможность применить импульсный лазер для записи пропускающих голограмм открывает новые возможности для производителей тиснёных голограмм. Скорость записи 100 см² цифровой голограммы с размером голопикселя 200x200 мкм на нашем экспериментальном принтере составляет ~180 минут, что намного быстрее любой существующей технологии записи цифровых мастер-оригиналов. Соответственно, большие мастер-оригиналы могут быть записаны за меньшее время, что открывает возможность записи больших мастер-оригиналов, содержащих глубокие 3D изображения.

Для проверки пригодности цифровых мастер-голограмм, изготовленных методом прямой записи, ОАО НПО «Криптен» была изготовлена никелевая матрица радужной псевдоцветной (true-color) голограммы «Бабочки» (рис. 9) размером 60x80 мм, записанной на экспериментальном принтере Геолы, показанном на рис. 1. Следует отметить, что время записи мастер-голограммы составило всего лишь 90 минут. Как видно из рис. 9, объём изображения виден даже при освещении матрицы диффузным источником света, что свидетельствует о перспективности такого способа изготовления голограмм для защиты торговых марок и для нужд полиграфической промышленности.

4. Выводы

Предложен и проверен метод численной оценки эффективности прямой записи цифровых голограмм, основанный на измерении интенсивности первого отражённого дифракционного максимума.

Применяя излучение коммерчески доступного импульсного лазера длиной волны 440 нм, возможно записать качественные ПЗЦГ пропускающие голограммы на коммерчески доступных фоторезистах (ma-P1200 и S1800), при этом необходимая экспозиция находится в пределах $9,8 \div 13$ мДж/см².

Исследованные фоторезисты обладают, по крайней мере, в 5 раз большей чувствительностью к импульсному излучению, чем к излучению постоянного источника, и по чувствительности сравнимы с материалами для голографии на основе галогенидов серебра.

Мастер-голограммы, изготовленные методом прямой цифровой записи, пригодны для изготовления качественных матриц для тиснения голограмм.

Благодарности

Исследование было частично финансировано по гранту Комитета Исследований Литвы No. MIP-091/2012 «Optically transparent polymeric nanocomposite shields for radiation protection» и ЗАО Геола Дигитал. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Yamaguchi M., Koyama T., Endoh H., Ohyama N., Takahashi S., and Iwata F. Development of full-parallax holoprinter, Proc. SPIE 2406, 50–56 (1995).
2. Klug M., Holzbach M., and Ferdman A. Method and apparatus for recording 1-step full-color full-parallax holographic stereograms, U.S. Patent No. US6330088B1 (1998).
3. Brotherton-Ratcliffe D., Vergnes F.M., Rodin A., and Grichine M. Method and apparatus to print holograms, Lithuanian Patent No. LT4842 (1999).
4. Brotherton-Ratcliffe D., Vergnes F.M., Rodin A., and Grichine M. Holographic Printer, U.S. Patent No. US7800803B2 (1999).
5. Баканас Р., Захаровас С., Николский А., Бразертон-Рэдклифф Д. Одношаговая ахроматическая пропускающая объёмная голограмма, изготовленная при помощи цифрового принтера с использованием 440 нм импульсного лазера, МТК № 4 (26), с. 11–14, 2012.
6. Lucente M. Diffraction-specific fringe computation for electroholography, PhD Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, (Massachusetts Institute of Technology, September 1994).
7. Rodin A., Vergnes F.M., and Brotherton-Ratcliffe D. Pulsed multicolour laser, EU Patent No, EPO 1236073 (2001).
8. Bjelkhagen H. and Brotherton-Ratcliffe D. Ultra-Realistic Imaging – Advanced Techniques in Analogue and Digital Colour Holography, Taylor & Francis 2013, ISBN-10: 1439827990 // ISBN-13: 978-1439827994.
9. Brotherton-Ratcliffe D., Zacharovas S., Bakanas R., Pileckas J., Nikolskij A., Kuchin J. Digital Holographic Printing using Pulsed RGB Lasers, SPIE: Optical Engineering, special edition on digital holography Opt. Eng. 50, 091307-1-9 (2011).
10. Sazonov Y., Gradova O., Zacharovas S., Bakanas R., Gudaitis G., Brotherton-Ratcliffe D. New Ultra-fine Grain Photofilm for Pulsed Colour Holography. Proceedings of the 7th International Symposium on Display Holography, 2006, ISBN: 0-9553527-1-1; 978-0-9553527-1-32006, p. 65–69.
11. European Framework 6 Project SilverCross, Main URL. <http://silvercrossproject.org/> (March 1, 2011).
12. Bayer News. <http://www.press.bayer.com/baynews/baynews.nsf/id/Photopolymer-films-for-volume-holography/> (December 7, 2010).
13. SmartfabgroupTM. Photoresist Database. <http://www.smartfabgroup.com/photoresists.php> (August 8, 2013).
14. Microposit®S1800® series photoresist. http://www.microchem.com/PDFs_Dow/S1800.pdf/ (August 8, 2013).
15. http://www.microresist.de/products/positive_photoresists/pdf/. (August 8, 2013).
16. Zacharovas S., Nikolskij A., Bakanas R., Brotherton-Ratcliffe D. One-step 3D full-colour and achromatic transmission holograms digitally printed using a 440 nm pulsed laser for embossed applications, Proc. SPIE 8644, Practical Holography XXVII: Materials and Applications, 864407 (March 1, 2013); doi:10.1117/12.2008469; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2008469>.



Рис. 9. Никелевая матрица радужной псевдоцветной (true-color) голограммы «Бабочки», изготовленная ОАО НПО «Криптен» с мастер-оригинала Геолы: **слева** – восстановление изображения с использованием протяжённого диффузного источника света; **справа** – восстановление изображения с использованием точечного направленного источника света



СВИДЕТЕЛЬСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАРТ ГЛУБИНЫ в системе пространственного зрения человека



Г.И. Рожкова, д.б.н., ИППИ РАН им. Харкевича, Москва;
С.В. Алексеевко, д.б.н., Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, СПб

Аннотация

Сделано предположение, что схожесть задач, решаемых зрительной системой, с техническими задачами, решаемыми инженерами при разработке 3D аппаратуры, приводит к схожести принципиальных подходов к переработке информации, используемых в зрительных зонах мозга человека и в 3D технике.

В частности, свойства чувствительных к диспаратности нейронов зрительной коры дают основания предполагать, что в зрительной системе используются возможности и преимущества карт глубины, которые сейчас широко применяются специалистами по конвертации 2D фильмов в 3D формате и в 3D телевидении.

Ключевые слова: пространственное зрение человека, чувствительные к диспаратности нейроны, карты глубины, 3D техника.

EVIDENCE OF EMPLOYING DEPTH MAPS
IN THE HUMAN SYSTEM OF SPATIAL VISION

G. Rozhkova, S. Alekseenko

Abstract

It has been suggested that similarity of some problems facing the human visual system and the engineers developing 3D devices could lead to similarity of principal approaches to information processing used in human visual brain and in 3D technique.

In particular, the properties of disparity-sensitive neurons in the visual cortex lead one to believe that human visual system is exploiting the potentialities and advantages of the depth maps that are now in common use among the specialists in conversion of movies from 2D to 3D format and in 3D telecast.

Keywords: human spatial vision, disparity-sensitive neurons, depth maps, 3D technique.

Введение

В настоящее время при создании стереофильмов и при передаче изображений в 3D телевидении фигурируют два основных метода [5, 31]:

— классический метод стереограмм, заключающийся в формировании и передаче двух равноценных массивов информации, кодирующих изображения сцены в двух разных ракурсах $I_L(x, y, t)$ и $I_R(x, y, t)$, и предназначенных

для раздельного наблюдения восстановленных изображений левым и правым глазом;

– метод DIBR (depth-image-based rendering), заключающийся в формировании и передаче двух качественно различающихся сопряжённых массивов информации, один из которых (основной) содержит закодированные одноканальные полноцветные 2D изображения сцены $I(x, y, t)$, а второй – карты глубины для каждого кадра основного потока $D(x, y, t)$, представляющие в одномерной шкале информацию о глубине каждого элемента сцены или объекта.

Замена стереопары на комплект из одного изображения и карты глубины имеет большие преимущества с точки зрения эффективности кодирования, помехоустойчивости при передаче информации, универсальности в отношении совместимости с разными приёмными устройствами.

Принципиальное различие между этими методами иллюстрирует рис. 1, на котором показано, как одна и та же снимаемая пространственная конфигурация может быть представлена при помощи пары изображений (рис. 1, а, б) и комплекта из одного изображения и карты глубины (рис. 1, а, в)

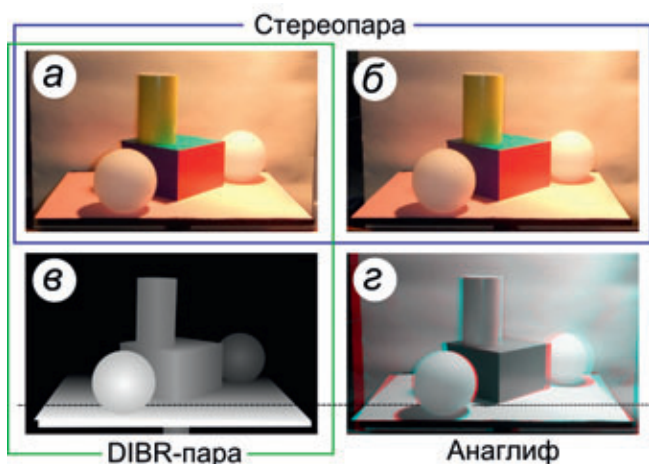


Рис. 1. Обычная стереопара, содержащая два изображения сцены (а, б), DIBR-пара (а, в), содержащая одно изображение сцены и карту глубины, и стереограмма в анаглифной форме (г). Пунктирной линией отмечен уровень нулевого параллакса

Как видно из рисунка, в первой паре, являющейся привычной стереограммой и состоящей из схожих и «равноправных» полноцветных изображений, картинка различается главным образом относительными сдвигами деталей. Это иллюстрирует рис. 1, г, где данная стереограмма представлена в анаглифной форме, наглядно выявляющей сдвиги контуров. Во второй паре два изображения различаются между собой качественно. В карте глубины информация заключена лишь в светлоте (яркости) точек, причём она не имеет ничего общего с реальной светлотой (яркостью) деталей сцены.

Карты глубины обычно представляют в виде чёрно-белых изображений, кодируя на них удаление от на-



Рис. 2. Кадр из отечественного фильма «Три мушкетера» и карта глубины, сделанная для этого кадра при конвертации фильма в 3D формат (материал любезно предоставлен С. Хетлеровичем)

блюдателя переходом от светлоты к темноте. Реальные соотношения светлоты объектов при этом не имеют никакого значения. К примеру, сравним светлоту шаров на рис. 1, а и рис. 1, в. Если на первом из этих изображений правый шар является самой светлой частью композиции, так как он лучше всего освещён, то на втором изображении этот шар является самым тёмным объектом, так как он находится дальше других от наблюдателя.

Карта глубины $D(x, y, t)$ – это функция, отражающая расстояние от съёмочной камеры до всех элементов снимаемой сцены. Если глубина каждой точки сцены задана, можно программно создавать виртуальные изображения этой сцены с любой другой близкой позиции наблюдения. Таким образом, карта глубины позволяет генерировать дополнительное изображение сцены в желаемом ракурсе. Другими словами, DIBR предоставляет некоторые возможности для варьирования парного кадра, что исключено в классическом методе, где стереопара изображений сцены однозначно фиксируется в момент съёмки.

Метод DIBR можно использовать не только при создании новых стереофильмов, но и для конвертации практически любых старых фильмов из формата 2D в 3D, что очень актуально на современном этапе развития стереокинематографа при дефиците 3D контента. Качество и детальность карт глубины, создаваемых при реальном использовании метода DIBR, существенно зависят от содержания кадров, технических возможностей и времени, отпущенного на обработку материала. На рис. 2 показана типичная карта глубины, созданная для одного кадра

в процессе конвертации обычного 2D фильма в 3D формат. При её сравнении с расчётной картой, представленной на рис. 1, в, бросается в глаза более грубая передача уровней глубины и упрощение структуры фона. Однако такое явное несовершенство карт может лишь в слабой степени отражаться на качестве 3D фильма, что обусловлено особенностями технологии DIBR.

У метода DIBR имеются свои преимущества и недостатки. Основное преимущество, существенное для 3D телевидения, заключается в относительной простоте частотных характеристик карт глубины: эти карты можно кодировать и фильтровать более эффективно, чем поток естественных изображений, тем самым уменьшая полосу, необходимую для передачи сигналов телевидения. Карты глубины допускают существенное сглаживание посредством низкочастотной фильтрации, причём по вертикали сглаживание может быть сильнее, чем по горизонтали, так как информация о глубине заключена преимущественно в горизонтальных параллаксах [31].

Что касается недостатков DIBR, то они очевидны:

– На приёмном конце приходится иметь не только обычную технику для визуализации принятых сигналов, но и модуль их предварительной обработки, обеспечивающий генерацию дополнительного изображения сцены в новом ракурсе для получения стереограммы (или нескольких изображений – при многоракурсной технике).

– В процессе генерации парного изображения нужно адекватно заполнять те области, где информация отсутствует – пустоты или «дыры», появляющиеся на создаваемых изображениях в тех участках, которые не были представлены в исходном изображении, но должны стать видимыми вследствие изменения ракурса.

– Для получения качественного виртуального изображения с правильной передачей светотени при новом ракурсе необходимо учитывать не только глубину объектов сцены, но и расположение источников света, что вполне осуществимо при создании стереофильмов, когда авторы сами организуют освещение, но практически нереализуемо в 3D телевидении в прямом эфире, так как решение задачи определения спектральных свойств и пространственных параметров освещения требует переработки большого количества информации.

Простейшие способы заполнения информационных пустот – интерполяция и экстраполяция. Обычно они дают удовлетворительные результаты, но в определённых ситуациях приводят к значительным ошибкам. Более сложные алгоритмы заполнения основываются на переборе гипотез о геометрии невидимых частей объектов и их окружения, а не на полевых автоматических процедурах обработки изображений.

Схема функционирования бинокулярной зрительной системы как стереосистемы

Структурно-функциональная организация бинокулярной зрительной системы человека очень сложна [1, 3, 4].

Что касается пространственного восприятия, то бинокулярное зрение как бы совмещает функции разных технических систем [2]. Перечислим некоторые из осуществляемых при этом операций:

– «съёмка двумя камерами на конвергирующих осях» – получение оптических изображений на сетчатках двух глаз при участии глазодвигательной системы, регулирующей позиции глаз (направление зрительных осей) и аккомодационной системы, осуществляющей фокусировку;

– перевод оптических изображений в другой формат – в реакции фоторецепторов сетчатки, составляющих матрицу сенсоров;

– кодирование и компрессия исходной информации об изображении, и передача её по зрительному нерву в мозговые отделы зрительной системы;

– формирование массивов информации о трёхмерной сцене в бинокулярных каналах (объединение левых и правых нейронных изображений в стереопары; извлечение информации о глубине на основе диспаратности корреспондирующих точек и элементов двух изображений);

– формирование монокулярных массивов информации о трёхмерной форме объектов и их расположении по глубине на основе различных монокулярных показателей – геометрических перспективных преобразований, светотени, параллакса движения, аккомодации, и др.;

– объединение двух монокулярных потоков и формирование стереопар с выделенными объектами на когнитивном уровне; оценка глубины на основе диспаратности корреспондирующих деталей объектов;

– построение моделей рассматриваемой сцены в параллельных подсистемах анализа информации;

– выбор наиболее правдоподобной модели сцены и её уточнение на основе сопоставления всей информации, поступившей из различных подсистем, а также сравнения с моделью, имеющейся в памяти;

– формирование видимого образа на основе окончательной модели рассматриваемой сцены с проецированием его во внешний мир в систему координат, определяемую позицией наблюдателя.

На рис. 3 приведена очень упрощённая схема некоторых путей передачи и переработки информации в зрительной системе. Она даёт общее представление о числе уровней переработки информации и параллельных путей, а также о сложных взаимоотношениях между различными блоками переработки информации. Чтобы выделить наиболее существенные для дальнейшего анализа детали, в схеме приведены названия лишь отдельных зон коры мозга. Первичная зрительная кора, т. е. первая зона коры мозга, в которую поступает зрительная информация, имеет обозначение V1 (V – от слова *visual*, 1 – предположительный номер в иерархии). Последующие зоны зрительного пути имеют аналогичные обозначения (V2, V3, V4... V8), однако в связи с более поздним обнаружением новых корко-

вых проекций сетчатки в пределах «старых» зон, более подробным изучением открытых ранее зон и уточнением связей между ними, а также неполнотой имеющейся информации, не удаётся придерживаться жёсткого правила присвоения названий в соответствии со схемой переработки информации [3].

Как показано на рис. 3, за исключением небольших областей, расположенных вдоль центральных вертикальных меридианов сетчаток, которые проецируются в оба полушария мозга, в левое полушарие поступают сигналы только от левых половин двух сетчаток, а в правое – от правых. По этой причине для полноценного анализа сигналов во всём поле зрения необходимо дублирование всех основных зрительных зон – они должны быть представлены в каждом полушарии, но на рис. 3 для облегчения схемы показано лишь одно полушарие. Бинокулярный анализ объектов, проецирующихся в левом и правом глазу на разные половины, возможен только благодаря межполушарным связям левых и правых зон V1 и V2 через мозолистое тело, которые подробно проанализированы в работах [1,6]. В соответствии с анатомическими данными, мозолистое тело обеспечивает стереопсис в двух секторах между лучами зрения, проходящими через точку бификсации взгляда (один – перед этой точкой, второй – позади неё). В зонах затылочной коры, выделенных жёлтым цветом, производится анализ зрительной информации, а в зонах височной и лобной коры (зелёные и сине-зелёные модули) эта информация используется для организации движений глаз и зрительно-управляемого поведения.

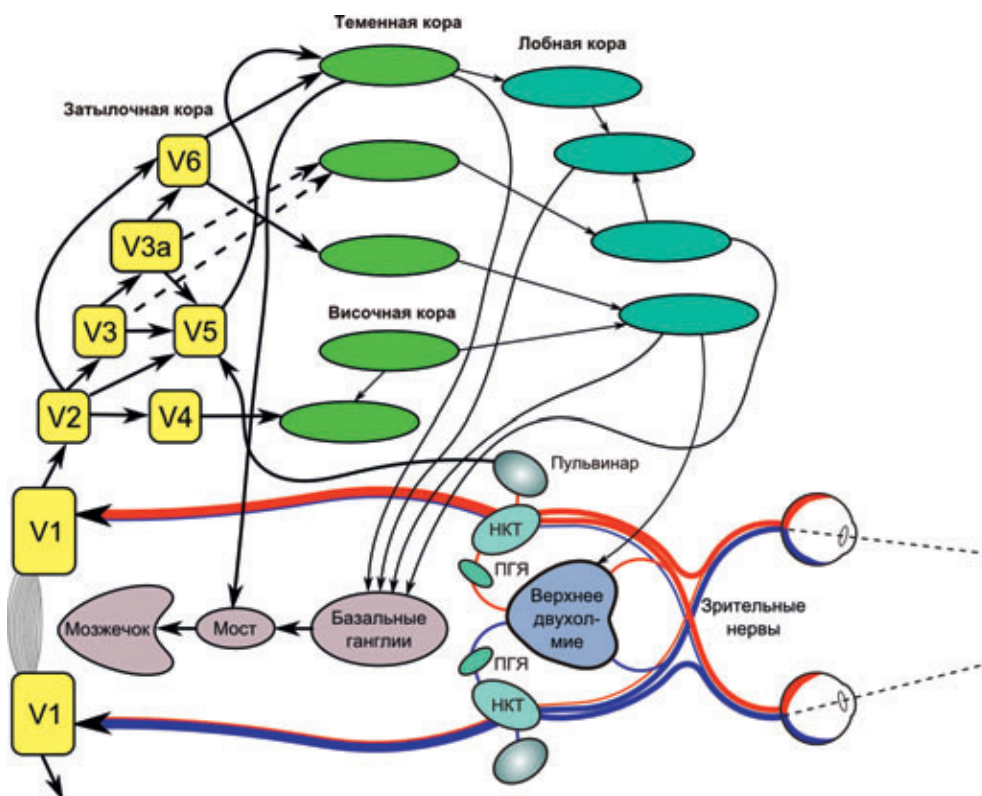


Рис. 3. Упрощённая схема зрительной системы человека

Общая организация мозговых зрительных зон, функциональные свойства нейронов

Несмотря на применение множества разнообразных методов исследования структурно-функциональной организации зрительной системы, принципы функционирования большинства её блоков ещё не вполне изучены по чисто техническим причинам (трудность доступа, методологические недоработки в постановке задач, методические сложности проведения эксперимента, возможность различной интерпретации полученных данных). Лучше всего изучены зрительные зоны коры больших полушарий мозга, что объясняется двумя основными причинами. Во-первых, благодаря анатомическим особенностям кора мозга более доступна для изучения, чем его внутренние зоны. Во-вторых, интересы физиологов и психологов долгое время были сосредоточены именно на коре, так как она считалась высшим интегративным центром. В связи с недостаточностью информации по другим зрительным отделам мозга, мы тоже ограничимся обсуждением данных по зрительной коре.

Для большинства зрительных зон коры мозга установлено, что они организованы ретинотопически, т.е. зрительная информация отображается на них в порядке, соответствующем порядку расположения соответствующих локусов на сетчатке, хотя масштабы могут сильно различаться. Можно сказать, что каждая зона мозга содержит модули, осуществляющие анализ сетчаточного изображения и его преобразование в вид, позволяющий легче выделять те или иные идентификационные, или информативные, признаки. Специфика зрительной

системы состоит в том, что в разных зонах производится выделение различных информативных признаков, поэтому и сетчаточные изображения воспроизводятся в них по-разному, а точнее – в каждой зоне отображаются разные свойства рассматриваемой наблюдателем сцены. Соответственно, разные зоны включены в разные схемы организации движений глаз (фиксационных движений, саккад, слежения за объектами) и зрительно-управляемого поведения человека (передвижения в пространстве, манипуляций с различными предметами, поиска объектов с заданными свойствами).

В психофизиологической литературе при-

нято подразделять зрительные пути на дорсальные, связанные преимущественно с восприятием движущихся объектов и двигательными актами, и вентральные, предназначенные для тонкого анализа свойств объектов, реконструкции 3D формы и узнавания. Оба пути начинаются от V1 и V2; далее дорсальный путь идёт через зоны V3a, V5 (MT), V7, а вентральный – через V4 и V8. Во многих зрительных зонах имеются нейроны, чувствительные к диспаратности – абсолютной и/или относительной. Согласно последним данным, в дорсальном пути больше нейронов, чувствительных к абсолютной диспаратности, а у нейронов вентрального пути примерно с одинаковой частотой встречается чувствительность к абсолютной и относительной диспаратности.

С конца 50-х годов прошлого века известно, что большая часть нейронов зоны V1 может быть возбуждена воздействием на любой глаз, т.е. эти клетки имеют рецептивные поля на обеих сетчатках. Было обнаружено, что у каждого бинокулярного нейрона организация двух рецептивных полей, как правило, почти одинакова и соответственно одинаков вид оптимальных стимулов, вызывающих наиболее сильные реакции, при их предъявлении левому и правому глазу. Кроме того, в нейрофизиологических опытах Хьюбел и Визель установили, что в зоне V1 эффективность связей бинокулярных нейронов коры с каждым из глаз сильно варьирует: одни нейроны получают возбуждающие сигналы только от правого глаза, другие – только от левого, третьи – от обоих глаз, но в разных пропорциях [13]. По силе связи с левым и правым глазом (глазодоминантности) все нейроны были разбиты на семь групп. В крайние группы (1 и 7) были включены нейроны, активируемые только левым или только правым глазом, в группу 4 – нейроны, активируемые с одинаковым успехом любым глазом, в промежуточные группы – нейроны, находящиеся под доминирующим влиянием одного из глаз, но активируемые и вторым. Примечательно, что в зоне V1 коры мозга разные нейроны соседствуют друг с другом в пределах одной и той же ретинопической карты. Другими словами, там как бы наложены (или вложены в общий матрикс) разные карты сетчатки, а следовательно, в этой зоне формируется несколько различных нейронных отображений рассматриваемой пространственной сцены: два монокулярных, суммарное (создаваемое нейронами, одинаково чувствительными к сигналам, поступающим из обоих глаз) и целый ряд отображений с разными весами вкладов двух глаз. Активность парных массивов нейронов – возбуждаемых только левым и только правым глазом – отражает информацию, содержащуюся в левом и правом сетчаточных изображениях, и соответствует исходной сетчаточной стереопаре. Нейроны, комбинирующие сигналы от двух глаз, могут выполнять различные функции, в том числе – сегментацию рассматриваемой сцены по глубине и определение диспаратности.

Нейроны – элементы карт глубины

Не исключено, что в зрительных зонах коры мозга формируются нейронные аналоги карт глубины. Рациональность использования таких карт в зрительной системе обусловлена общими принципами анализа сетчаточных изображений. Как уже отмечалось, обработка зрительной информации производится параллельно во многих функциональных модулях, определяющих различные свойства предметов видимой сцены – цвет, форму, скорость движения и др. Кластеры возбуждённых модулей помогают эффективно проводить сегментацию сцены и идентификацию объектов. Есть основания предполагать, что аналогичным образом дело обстоит и с анализом пространственных свойств. В частности, характеристики некоторых нейронов указывают на то, что они могут быть элементами карт глубины.

Самый прямой способ создания карт глубины – вычисление диспаратностей для всех элементов сетчаточного изображения. Однако это не всегда легко осуществить, так как сначала надо найти сопряжённые (корреспондирующие) элементы двух изображений. Иногда для этого необходимо произвести достаточно сложный анализ, так как объективно соответствующие детали двух изображений могут существенно различаться по форме, яркости, чёткости и скорости движения по сетчатке. Возможно поэтому нейроны, чувствительные к диспаратности, но существенно различающиеся по своим свойствам, имеются в разных зонах коры [9–11, 14, 16–30]. Более того, в оценке расположения по глубине объектов, находящихся на разных расстояниях от наблюдателя, могут участвовать принципиально разные механизмы, основанные не только на диспаратности, но и на анализе аккомодации, вергенции, параллакса движения, «изобразительных признаков» (окклюзии, светотени, геометрической и воздушной перспективы и т.д.). К примеру, использование диспаратности возможно только в пределах радиуса стереоскопической глубины [10], а изменение аккомодации не может ощущаться за пределами 50 м. В связи с подобными ограничениями разные карты или части карт глубины могут строиться на разных уровнях переработки зрительной информации – в разных отделах мозга. При этом такие карты могут частично дублировать, а частично дополнять друг друга.

Элементами карт глубины или их предшественниками могут быть те бинокулярные нейроны зоны V1, которые практически не реагируют ни на какие монокулярные стимулы, но сильно реагируют на бинокулярные стимулы и при этом чувствительны к абсолютной диспаратности. Как выяснилось, эта чувствительность может быть связана либо с диспаратностью рецептивных полей, имеющих одинаковую структуру, но несколько различающиеся координаты на двух сетчатках, либо с внутренними различиями в структуре рецептивных полей, совпадающих по координатам. Примечательно, что у многих нейронов бинокулярное взаимодействие остаётся сильным при значительной разнице в контрасте ле-

вого и правого стимулов и практически не зависит от их цвета, подтверждая гипотезу о принадлежности этих нейронов к модулям, предназначенным для анализа пространственных, а не яркостных или цветовых свойств.

Исследуя чувствительные к диспаратности нейроны зон V1 и V2, Поджио и Фишер разбили их на четыре типа [20]. Первые два типа составили нейроны, настроенные на узкий диапазон диспаратностей вблизи нуля, т. е. наиболее сильно реагирующие на стимулы, попадающие в зону бификсации; между собой эти два типа различались по характеру реакции: возбуждение-торможение. В зарубежной литературе они сокращённо обозначаются ТЕ (tuned excitatory) и ТИ (tuned inhibitory). Эти типы нейронов схематически представлены на рис. 4, а, где условно показаны кривые избирательности таких нейронов без указания знака реакций. Ещё два типа составили нейроны, дающие противоположные реакции при диспаратностях разного знака: FA (far activated) – возбуждаемые объектами, находящимися дальше точки фиксации и тормозимые объектами, находящимися ближе точки фиксации, и NE (near excitatory) – возбуждаемые объектами, находящимися ближе точки фиксации и тормозимые объектами, находящимися дальше точки фиксации (рис. 4, б, в).

Примечательна корреляция между типом чувствительности к диспаратности и типом глазодоминантности бинокулярных нейронов, которая имеет место и для обезьяны и для кошки. Нейроны с приблизительно равной эффективностью монокулярных входов обычно настроены на глубину, соответствующую точке фиксации, и относятся к типу ТЕ. Среди нейронов с выраженным доминирующим влиянием одного глаза преобладают типы ТИ, NE и FA, причём, у NE- и FA-нейронов доминируют входы из противоположных глаз [20]. Напрашивается предположение, что описанные нейроны формируют текущие карты глубины, на которых зона вокруг точки фиксации (соответствующая направлению взгляда и зоне внимания) представлена достаточно подробно в крупном масштабе, а передний и задний планы намечены грубо: объекты просто рассортированы по отношению к точке фиксации – ближе/дальше. Необходимость в подробной карте для зоны внимания кажется очевидной, но и грубому разделению остального пространства на ближнюю и дальнюю зоны также можно найти объяснение. Поскольку объект в ближней или дальней зоне, на который будет переведено внимание в следующий момент, требует соответствующего перевода взгляда, зрительная система должна дать глазодвигательной системе команду на совершение конвергентных или дивергентных движений. Учитывая, что управление конвергенцией и дивергенцией производится различными подсистемами, а совершить действие часто требуется быстро, первоначальный выбор управляющей подсистемы представляется весьма полезным.

Возможно, уже в зонах V1 и V2 имеется несколько различных карт глубины, кодирующих глубину объектов различного типа. Об этом свидетельствует тот факт, что

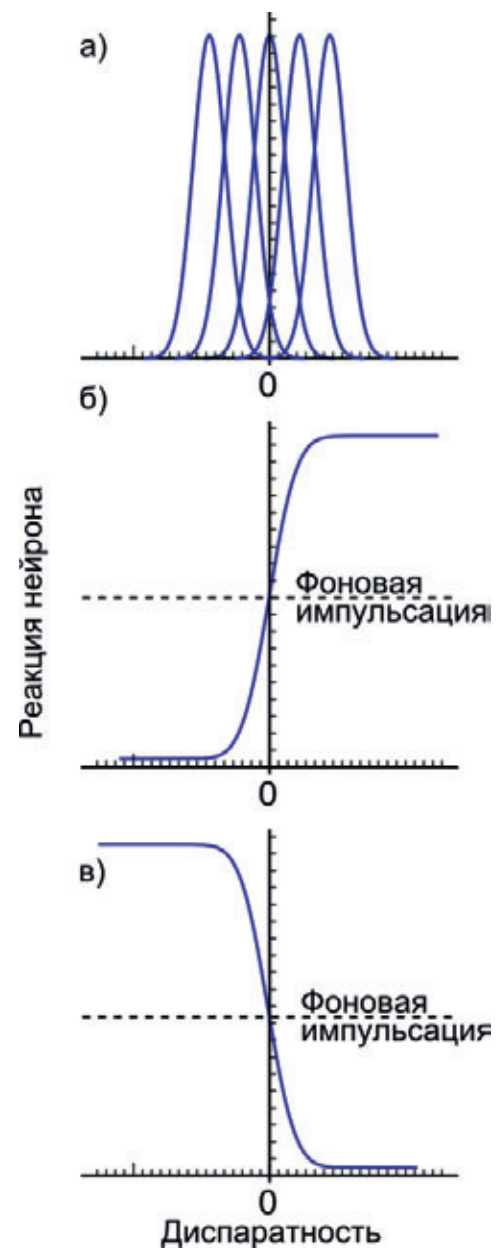


Рис. 4. Типы кривых чувствительности к диспаратности у нейронов зрительной коры (по данным Поджио и Фишера [20])

при исследовании чувствительности к диспаратности с использованием стимулов различного типа обнаруживались принципиальные различия между нейронами. Примеры стимулов трёх различных типов приведены на рис. 5, где области, соответствующие рецептивному полю нейрона, обведены пунктирными линиями: красной – для левого глаза и зелёной – для правого. Тест-объектом, диспаратность которого варьировали для выявления избирательности нейронов, во всех трёх случаях была вертикальная полоска, но её границы обозначались по-разному. В первом случае полоска отличалась от фона по светлоте (обычный монокулярно узнаваемый объект); во втором случае полоска кодировалась случайно-точечной стереограммой (чисто бинокулярный, или ци-

клопический, объект); в третьем – границы полосы были иллюзорными, они формировались за счёт действия механизмов интерполяции (объект с субъективными или когнитивными контурами). Некоторые нейроны реагировали только на стимулы первого типа, другие – на стимулы первого и второго типов, третьи – на все стимулы.

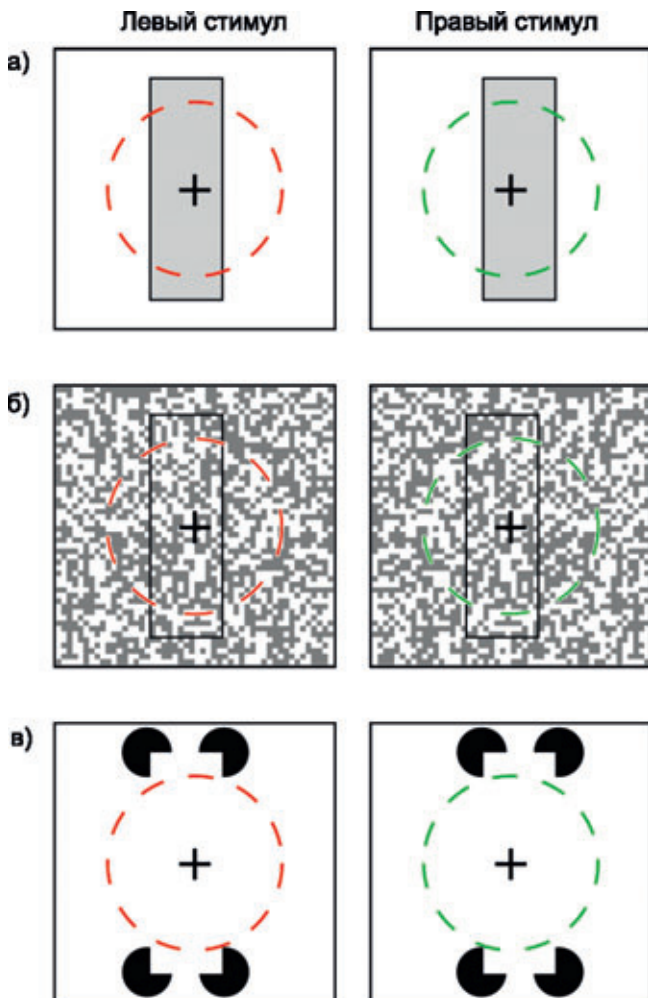


Рис. 5. Тест-объекты, применявшиеся для исследования чувствительности нейронов к диспаратности: а) – обычные полосы, отличающиеся от фона по светлоте; б) – полосы, кодируемые случайно-точечными стереограммами; в) – полосы, выделяемые иллюзорными контурами

Среди опубликованных работ выделяются работы, выполненные на бодрствующих обезьянах, которых со временем становится всё больше. Пионерами таких исследований были Поджио и его соавторы [11, 20, 21]. Последняя публикация особенно интересна тем, что в ней сопоставлены реакции бинокулярных нейронов на монокулярно узнаваемые стимулы и циклопические объекты. Поэтому имеет смысл рассмотреть в качестве примера именно эту работу. Авторы исследовали реакции 244 нейронов полей 17 (зона V1) и 18 (зоны V2 и V4) зрительной коры обезьяны на динамические стереограммы обычного типа (яркие или тёмные полосы, появляющиеся в двух рецептивных

полях или движущиеся через них и имеющие варьируемую диспаратность по отношению к фону) и на динамические случайно-точечные стереограммы, кодирующие аналогичные циклопические объекты (полосы, сдвинутые относительно фона по глубине).

Примечательно, что в зоне V1 не было обнаружено нейронов, реагирующих на стимулы с иллюзорными контурами, но в зоне V2 они встречались. Это не удивительно, так как выделение таких объектов требует более сложного анализа. Как видно из рис. 5, в, в этом случае в рецептивных полях нейронов, условно обозначенных пунктиром, вообще не было признаков наличия тест-объектов. Иллюзорные контуры, создающие основу для восприятия полосы, должны были формироваться за счёт обработки информации по значительной площади за пределами рецептивного поля нейрона.

При сопоставлении чувствительности к диспаратности у нейронов из различных зон затылочной коры (V1, V2, V3, V4) исследователи отмечают постепенное нарастание процента нейронов, чувствительных не к абсолютной, а к относительной диспаратности. Если в области V1 таких нейронов не описано, то в V2 и V3 они уже регистрируются, хотя и в незначительном количестве, а в V4 составляют доминирующее большинство [8, 10, 24, 29]. Нейроны, имеющие отношение к анализу глубины, активно исследовались не только в зрительных зонах затылочной коры, но и в ряде других областей мозга, в частности, в височной коре (зона V5/MT) и в теменных областях. В зоне V5 были описаны нейроны, избирательно реагирующие на приближающиеся и удаляющиеся стимулы, а также на стимулы, движущиеся во фронтально-параллельной плоскости [25, 26]. Очень интересные данные были получены для нейронов одной из подобластей зоны MT обезьяны – MST [22]. Авторы нашли там два типа нейронов: нейроны первого типа активировались только при одном знаке диспаратности, предпочитая при этом определённое направление движения по горизонтали – влево или вправо; нейроны второго типа при смене знака диспаратности меняли предпочитаемое направление движения на противоположное. По мнению авторов, исследованные нейроны могут иметь отношение к анализу движения сетчаточных проекций объектов, находящихся ближе или дальше точки фиксации взора, при собственных движениях животного, когда оно смотрит в сторону. Как известно, проекции ближних и дальних объектов движутся при этом в противоположных направлениях. Авторы полагают, что нейроны первого типа могут быть детекторами направления движения переднего и заднего планов, а второго типа – детекторами направления движения самого животного.

Проведённые количественные исследования избирательности нейронов зоны V5 показали, что они более точно настроены на определённые значения диспаратности и что общий диапазон настройки у них покрывает более широкий интервал значений, чем у нейронов V1, составляя около 6° против $\pm 1^\circ$.

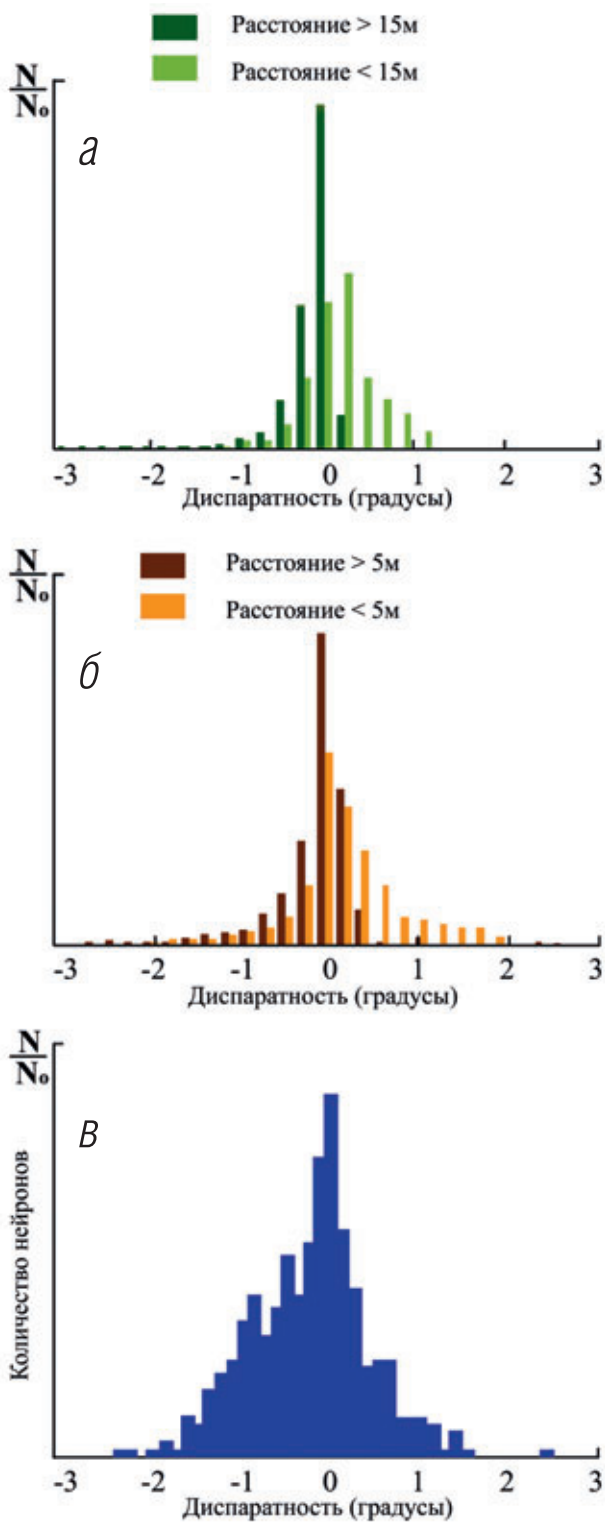


Рис. 6. Сравнение распределений диспаратности при наблюдении естественных сцен [15] и экспериментальных данных по настройке на диспаратность у нейронов зрительной зоны V5 [7]: а - результаты измерений диспаратности на открытом воздухе в лесистой местности; б - результаты измерений диспаратности в разных помещениях; в - нейрофизиологические данные оценки оптимальных значений диспаратности у 471 нейрона зоны V5

Корреляция данных по распределению диспаратности в естественных сценах и чувствительности нейронов к диспаратности

В последние годы в связи с повышением интереса к 3D технологиям появились работы по исследованию распределений диспаратностей в различных естественных и модельных сценах и соответствующему анализу свойств бинокулярных нейронов [12, 15]. По общему впечатлению, имеющиеся данные свидетельствуют об удовлетворительном соответствии между «техническим заданием», определяемым свойствами среды, и характеристиками бинокулярной воспринимающей системы. Для демонстрации этого соответствия на рис. 6 сопоставлены результаты двух разнородных экспериментальных исследований: изучения распределений диспаратностей при рассмотрении различных естественных сцен [15] и оценки избирательности к диспаратности у нескольких сотен нейронов зоны V5 [7].

Хотя очевидно, что ручаться за репрезентативность исследованных естественных сцен и нейронных выборок можно лишь с оговорками, нельзя не отметить схожесть представленных гистограмм, как по общему диапазону, так и по ширине гистограмм. При этом следует учитывать, что здесь приведены данные лишь для одной зрительной зоны и лишь для определённых сцен. Как видно из сопоставления гистограмм диспаратностей для разных расстояний до точки фиксации, этот параметр существенно влияет на вид распределения, поэтому такие гистограммы должны быть очень индивидуальными, отражая особенности повседневной жизни и деятельности конкретного наблюдателя. Что касается нейронов разных зон, то у них предпочтения также могут варьировать. В частности, следует отметить, что у нейронов зоны V1 распределение предпочтительных диспаратностей существенно уже и симметричнее. Это может быть связано с тем обстоятельством, что зона V1 осуществляет анализ ситуации в основном в окрестности точки фиксации взора, а в зоне V5, по-видимому, уже производится интегрирование информации по большей части видимого пространства.

Заключение

- Нейрофизиологические данные указывают на возможность формирования в зрительных зонах мозга карт глубины на основе реакций нейронов, настроенных на разные значения диспаратности и слабо чувствительных к контрасту и цвету стимулов.

- В разных зонах мозга на основе выделения и оценки диспаратности различных элементов изображений – точек, границ, когнитивных контуров – могут формироваться дополняющие друг друга карты глубины.

- В первичных зонах зрительной коры во время фаз фиксации взора создаются оперативные (текущие) карты глубины для объектов, находящихся вблизи пло-

скости фиксации (точнее – гороптера). Эти карты формируются нейронами, чувствительными к абсолютной диспаратности в пределах $\pm 1^\circ$.

• Оперативные карты глубины интегрируются на последующих уровнях обработки зрительной информации в единую карту для всего видимого пространства. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев С.В.* Морфо-функциональные основы формирования в коре головного мозга отображения зрительного пространства // Автореферат д.б.н. СПб, 2003.
2. *Валюс Н.А.* Стерео: Фотография, кино, телевидение. М.: Искусство, 1986, 263 с.
3. *Пигарев И.Н.* Экстрастриарные зрительные зоны коры мозга. В кн. Руководство по физиологии. Физиология зрения. М.: Наука, 1992, с. 345–400.
4. *Рожкова Г.И.* Бинокулярное зрение. В кн. Руководство по физиологии. Физиология зрения. М.: Наука, 1992, с. 586–664.
5. *Хетлерович С.* Конвертация видеоматериалов в стереоформат – особенности, возможности и ограничения. МТК, № 16, с. 9–11, 2010.
6. *Хьюбел Д.* Глаз, мозг, зрение. М.: МИР, 1990, 239 с.
7. *DeAngelis G.C., Uka T.* Coding of horizontal disparity and velocity by MT neurons in the alert macaque. J. Neurophysiol., V. 89, №3 (1), p. 1094–1111, 2003.
8. *Anzai A., Chowdhury S.A., DeAngelis G.C.* Coding of Stereoscopic Depth Information in Visual Areas V3 and V3A. J. Neurosci., V. 31, № 28, p. 10270–10282, 2011.
9. *Cottreau B.R., McKee S.P., Norcia A.M.* Bridging the gap: global disparity processing in the human visual cortex. J. Neurophysiol., V. 107, № 9, p. 2421–2429, 2012.
10. *Cumming B.G., Parker A.J.* Binocular neurons in V1 of awake monkeys are selective for absolute, not relative, disparity. J. Neurosci., V. 19, № 13, p. 5602–5618, 1999.
11. *Fisher B., Poggio G.F.* Depth sensitivity of binocular cortical neurons of behaving monkeys. Proc. Roy. Soc. London B, V. 204, p. 409–414, 1979.
12. *Hibbard P.B.* A statistical model of binocular disparity. Visual Cognition, V. 15, p. 149–165, 2007.
13. *Hubel D.H. & Wiesel T.N.* Brain and visual perception. New York: Oxford University Press, p. 744, 2005.
14. *Krug K., Parker A.J.* Neurons in dorsal area V5/MT signal relative disparity. J. Neurosci., V. 31, p. 17892–17904, 2011.
15. *Liu Y., Bovik A.C., Cormack L.K.* Disparity statistics in natural scenes. Journal of Vision, V. 8, № 11(19), p. 1–14, 2008.
16. *Neri P., Bridge H., Heeger D.J.* Stereoscopic processing of absolute and relative disparity in human visual cortex. J. Neurophysiol., V. 92, p. 1880–1891, 2004.
17. *Nguenkim J.D., DeAngelis G.C.* Disparity-based coding of three-dimensional surface orientation by macaque middle temporal neurons. J. Neurosci., V. 23, p. 7117–7128, 2003.
18. *Ohzawa I., DeAngelis G.C., Freeman R.D.* Stereoscopic depth discrimination in the visual cortex: Neurons ideally suited as disparity detectors. Science, V. 249, p. 1037–1041, 1990.
19. *Patten M.L., Murphey A.P.* Relative disparity processing in the dorsal visual pathway. J. Neurosci., V.32, № 16, p. 5353–5355, 2012.
20. *Poggio G.F., Fischer B.* Binocular interaction and depth sensitivity in striate and prestriate cortex of behaving rhesus monkey. J. Neurophysiol., V. 40, p. 1392–1405, 1977.
21. *Poggio G., Motter B., Squatrito S., Trotter Y.* Responses of neurons in visual cortex (V1 and V2) of the alert macaque to dynamic random-dot stereograms. Vision Res., V.25, p. 397–406, 1985.
22. *Roy J.P., Wurtz R.H.* The role of disparity-sensitive cortical neurons in signaling the direction of self-motion. Nature, V. 348, p. 160–162, 1990.
23. *Srivastva S., Orban G.A., De Maziere P.A., Janssen P.A.* A distinct representation of three-dimensional shape in macaque anterior intraparietal area: fast, metric and coarse. J. Neurosci., V. 29, p. 10613–10626, 2009.
24. *Thomas O.M., Cumming B.G., Parker A.J.* A specialization for relative disparity in V2. Nat Neurosci., V. 5, № 5, p. 472–478, 2002.
25. *Toyama K., Fujii K., Kasai S., Maeda K.* The responsiveness of Clare-Bishop neurons to size cues for motion stereopsis. Neurosci Res., V. 4 (2), p.110–128, 1986.
26. *Toyama K., Komatsu Y, Kozasa T.* The responsiveness of Clare-Bishop neurons to motion cues for motion stereopsis. Neurosci Res., V. 4 (2), p.83–109, 1986.
27. *Tsao D.Y., Conway B.R., Livingstone M.S.* Receptive fields of disparity-tuned simple cells in macaque V1. Neuron, V. 38, p. 103–114, 2003.
28. *Uka T., DeAngelis G.C.* Linking neural representation to function in stereoscopic depth perception: roles of area MT in coarse vs. fine disparity discrimination. J. Neurosci., V. 26, p. 6791–6802, 2006.
29. *Umeda K., Tanabe S., Fujita I.* Representation of stereoscopic depth based on relative disparity in macaque area V4. J. Neurophysiol., V. 98, p. 241–252, 2007.
30. *Westheimer G.* The third dimension in the primary visual cortex. J. Physiol., V. 587, p. 2807–2816, 2009.
31. *Zhang L., Tam W.J., Wang D.* Stereoscopic image generation based on depth images for 3D TV. IEEE International Conference on Image Processing, p. 2993–2996, 2004.



ПРОЕКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ для литографии



С.Б. Бирючинский,
к.ф.-м.н., СПбГУКиТ

Аннотация

В работе рассмотрены основные процедуры оптимизации литографического объектива на длину волны 365 нм. Показан вариант системы и даны рекомендации по оптическим расчётам подобных объективов.

Ключевые слова: объектив, литография, aberrации.

Введение

Проекционная литография с применением световых источников ультрафиолетового диапазона является самым распространённым видом технологического процесса в микроэлектронике. В настоящее время наибольшее распространение получили технологические процессы на базе источников 193 нм (эксимерный ArF лазер), а также 365 нм (дуговая ртутная лампа). Наиболее высокое разрешение получено с применением источников на 13,5 нм (EUV литография), однако, в силу специфики технологического процесса, данные технологии применимы только для определённого узкого круга задач. Применение масок с шаговым сдвигом в сочетании с технологией иммерсионной литографии (показатель преломления иммерсии до 1,8) позволяет эффективно осуществлять практическую реализацию 32 нм техпроцесса [2].

Реализация столь малого техпроцесса (по отношению к длине волны источника) позволяет значительно снизить себестоимость выпускаемых изделий, что особенно актуально в бытовой и полупрофессиональной видеотехнике. Данная технология широко применяется, в том числе, и для производства сигнальных процессоров ви-

PROJECTION OPTICAL SYSTEMS FOR LITHOGRAPHY

S. Biryuchinskiy

Abstract

In paper the basic optimisation procedures of a lithographic objective for length of a wave 365 nm are considered. The author's variant of system is shown and recommendations about optical calculations of similar objectives are made.

Keywords: objective, lithograph, aberrations.

деообработки, некоторых видов матричных фотоприёмников (в том числе, пригодных и для профессиональной киносъёмки), а также аналого-цифровых преобразователей. Другим, не менее важным, направлением являются телекоммуникационные приложения.

Основная часть

В настоящей работе представлен проекционный объектив, рассчитанный на длину волны 365(±3) нм. Установка, для которой предназначен объектив, подобна системе, описанной в [2]. Работа объектива 16 (рис. 1) заключается в переносе изображения сетки 18, подсвеченной источником 12, на подложку 20.

Данная система обладает пятикратным увеличением и линейным диаметром поля зрения 23 мм. Разработанный автором объектив (рис. 2) не содержит асферических поверхностей, точность центрирования линзовых компонентов составляет около 1,5 мкм, виньетирование полностью отсутствует. Объектив содержит двадцать линз, марки стёкол специально подбирались для достижения оптимального светопропускания на длине волны 365 нм. На рисунках 3–6 показаны основные оптические

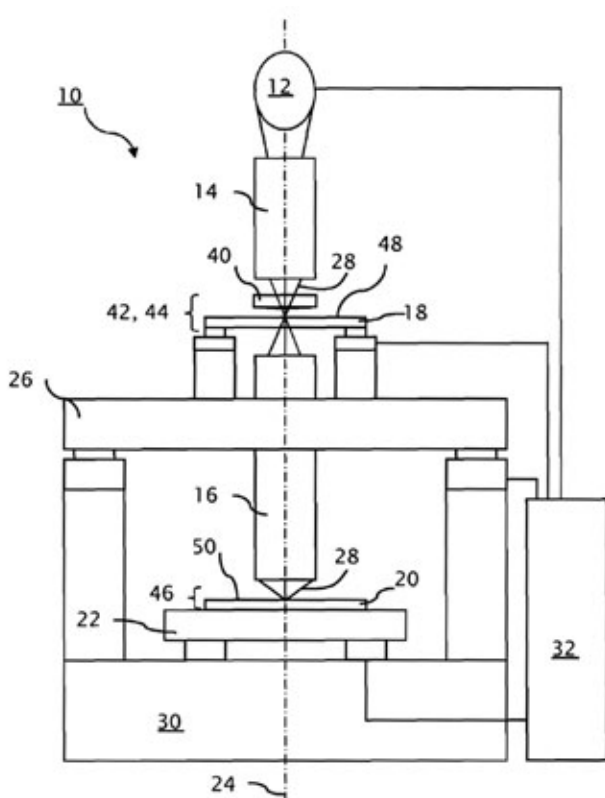


Рис. 1. Схема установки для проекционной микролитографии [2]

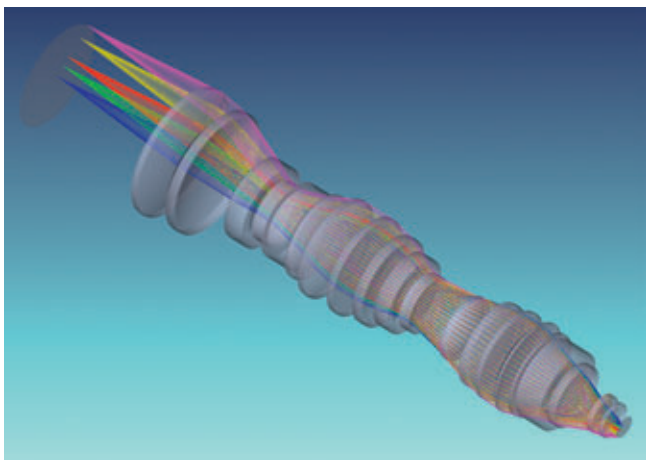


Рис. 2. Проекционный объектив с корректором телецентричности

характеристики системы. Достигнуто дифракционное качество изображения по всему полю (число Штреля более 0,9). Дисторсия системы не превышает 50 нм. Числовая апертура разработанного объектива составляет 0,42, что обеспечивает требуемую глубину резкости изображения (более 1 мкм). Поскольку объектив является безиммерсионным, то для повышения разрешающей способности применяется технология двойной экспозиции в сочетании с нелинейными фоторезистами.

Несмотря на относительную узость спектральной линии ртутной лампы (несколько нм), её ширина оказывается достаточной, чтобы вызвать значительный хро-

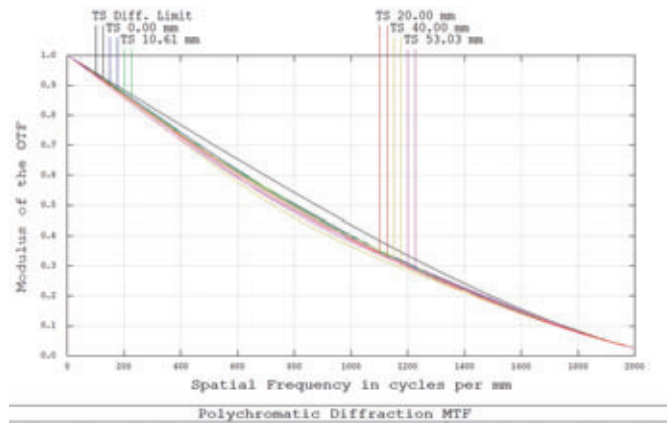


Рис. 3. Графики передаточной функции рассчитанного объектива

матизм даже в системах из нескольких материалов с обычным ходом дисперсионной кривой. На практике нет необходимости добиваться именно апохроматического решения (в классическом понимании), но задача уменьшения вторичного спектра должна решаться очень тщательно. В предложенном объективе (рис. 2) применение всего трёх линз из флюоритоподобных стёкол позволяет скомпенсировать хроматизм до приемлемого уровня.

Не менее важной задачей является также температурная компенсация оптических параметров системы. Учитывая требования к качеству изображения объектива, точная термокомпенсация даже в ограниченных диапазонах не представляется возможной (чем точнее компенсация, тем хуже общее светопропускание системы из-за применяемых материалов и длины оптического пути в них). В большинстве случаев допускается изменение оптической силы объектива при изменении температуры системы, но при сохранении требуемого качества изображения. На практике литографические объективы термостатируют с точностью 0,01°C, однако поглощение источника излучения в линзах объектива приводит к неравномерному нагреву системы, что и должно учитываться при оптимизации термооптических aberrаций.

Основную сложность в проектировании подобных систем представляет необходимость телецентричности хода лучей, с точностью нескольких мрад. В рассматриваемом варианте системы отклонение от телецентричности в плоскости изображения (измеренное по главному лучу) не превышает 4 мрад. Данное требование вызвано необходимостью работы объектива в режиме с повышенной глубиной резкости изображения для реализации некоторых технологических процессов (в том числе, за счёт изменения диаметра апертурной диафрагмы). При этом не допускается значимых (до 20 нм при толщине зоны обработки 8 мкм) поперечных смещений энергетических центров кружков рассеяния на разных глубинах. Особый интерес представляет собой процесс оптимизации системы с учётом взаимного влияния дисторсии, телецентричности (в обоих пространствах), кривизны поля на истинное положение энергетического центра фокаль-

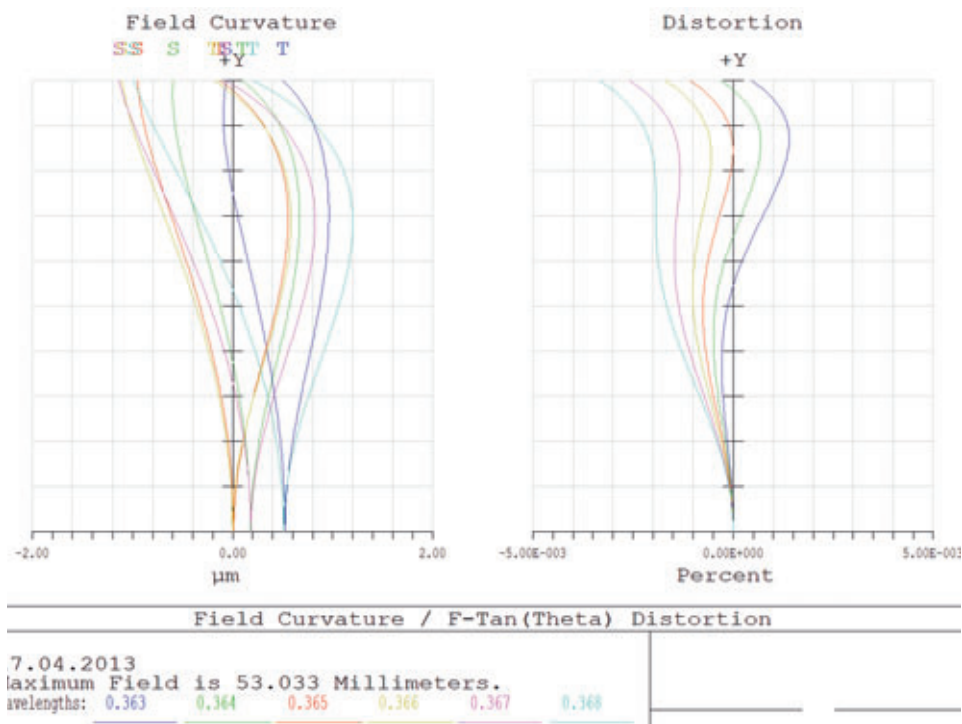


Рис. 4. Кривизна поля и дисторсия

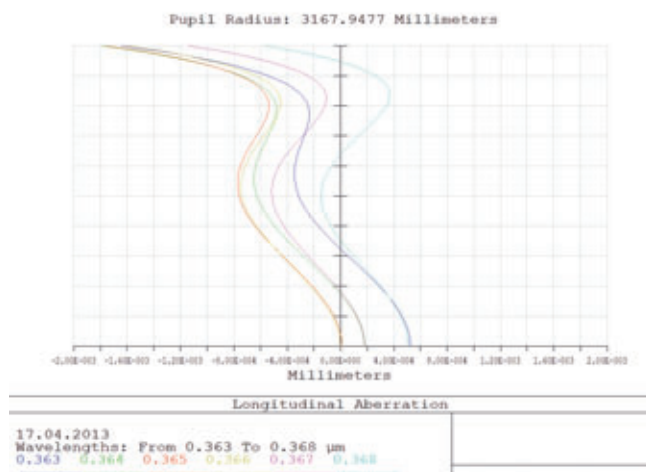


Рис. 5. Продольная сферическая абберация

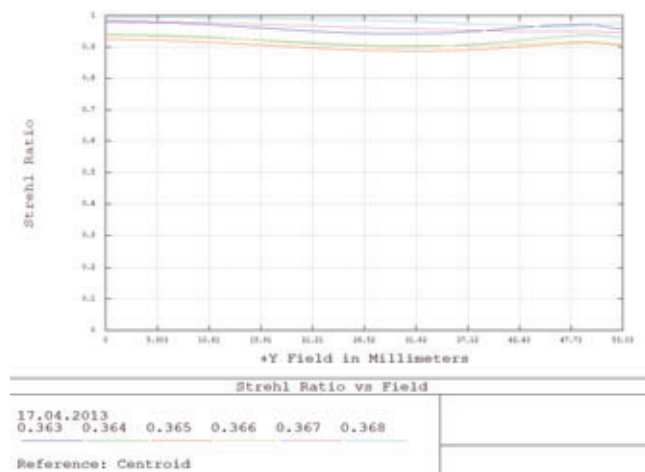


Рис. 6. Графики числа Штреля для рабочих длин волн

ного пятна. В общем случае энергетический центр фокального пятна в подобных объективах может заметно не совпадать с позицией главного луча в системе, что делает неприемлемым применение классических [1] методик расчёта. Например, в предложенном объективе дисторсия частично компенсируется введением aberrаций высших порядков, которые смещают энергетический центр фокального пятна в требуемую позицию, при этом значение введённых aberrаций слишком мало для существенного ухудшения числа Штреля системы. Такая методика позволяет получить дополнительные степени свободы в оптимизационном процессе и, соответственно, реализовать более эффективное решение. Данный механизм поиска оптимального решения может применяться также и в объективах другого назначения,

особенно там, где требуются одновременно высокое качество изображения, низкая дисторсия и широкий угол поля зрения [3].

Существуют различные методы решения задачи коррекции отклонений от телецентричности литографических объективов. Наиболее эффективным является решение, описанное в [2]. Рис. 7, 8 иллюстрируют принцип действия корректоров, заключающийся в размещении вблизи фокальных плоскостей тонких корректирующих пластинок с асферическими поверхностями сложного профиля. В общем случае поверхности корректоров могут не обладать центром симметрии (произвольная форма поверхности). Такой подход позволяет решить задачу достижения телецентрического хода лучей (в общем случае в обоих пространствах) одновременно с коррекцией

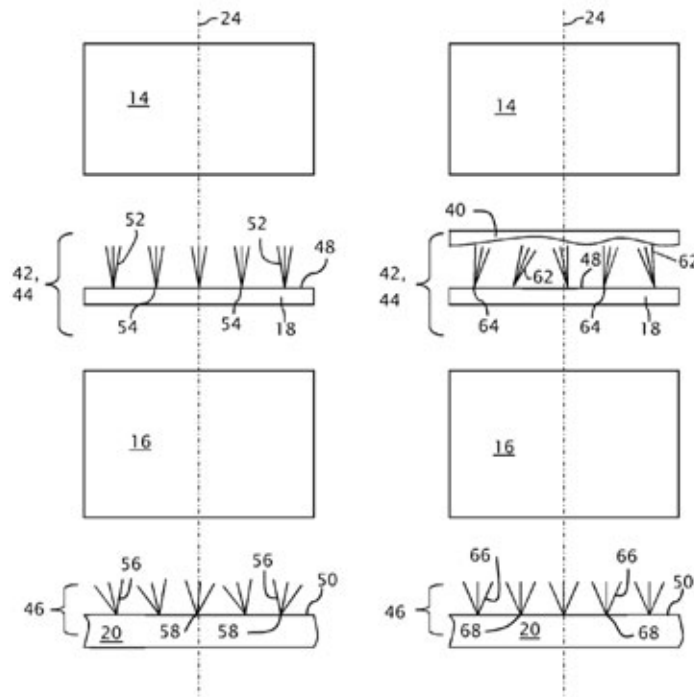


Рис. 7. Принцип действия корректора телецентричности системы [2]

дисторсии (локальное отклонение телецентричности и дисторсия системы здесь взаимосвязаны). При этом, как правило, процедура расчёта корректора производится уже после изготовления и юстировки объектива, что позволяет существенно снизить себестоимость изделия при выдающихся оптических характеристиках. Основным недостатком данного метода является близость корректора к плоскости изображения, что существенно ограничивает применение подобных объективов в различных литографических процессах (происходит загрязнение фронтальной поверхности корректора).

На рис. 9 показаны внефокальные изображения точки оптимизированного объектива для центра поля зрения (а) и на линейной дистанции 10,6 мм (б). Расстояние от фокальной плоскости составляло 8 мкм. Видны заметные отклонения в качестве внефокального пятна на линейной дистанции 10,6 мм, хотя по другим критериям (число Штреля или передаточная функция) отклонений не наблюдается.

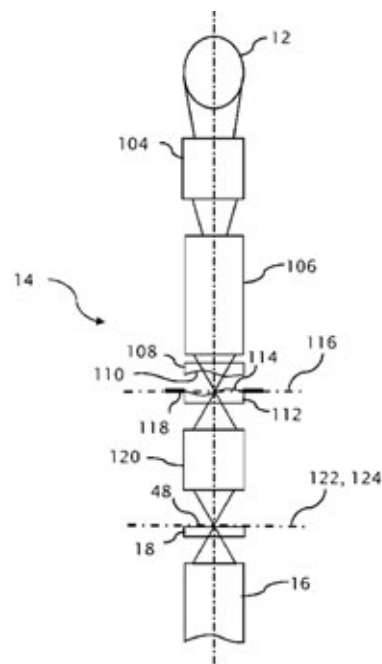
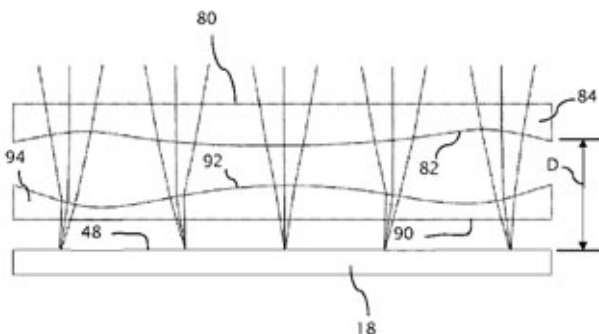


Рис. 8. Схема расположения корректора телецентричности [2]

Введение всего одного асферического компонента позволяет полностью решить задачу с оптимизацией дисторсии и локальной телецентричности системы, при этом улучшить качество изображения, что позволяет теоретически создать большой технологический запас при сборке/юстировке объектива (рис. 10, 11). Однако на практике, как правило, корректировать дисторсию и телецентричность приходится дополнительными методами.

Таким образом, исправление всех aberrаций объектива в плоскости изображения оказывается недостаточным

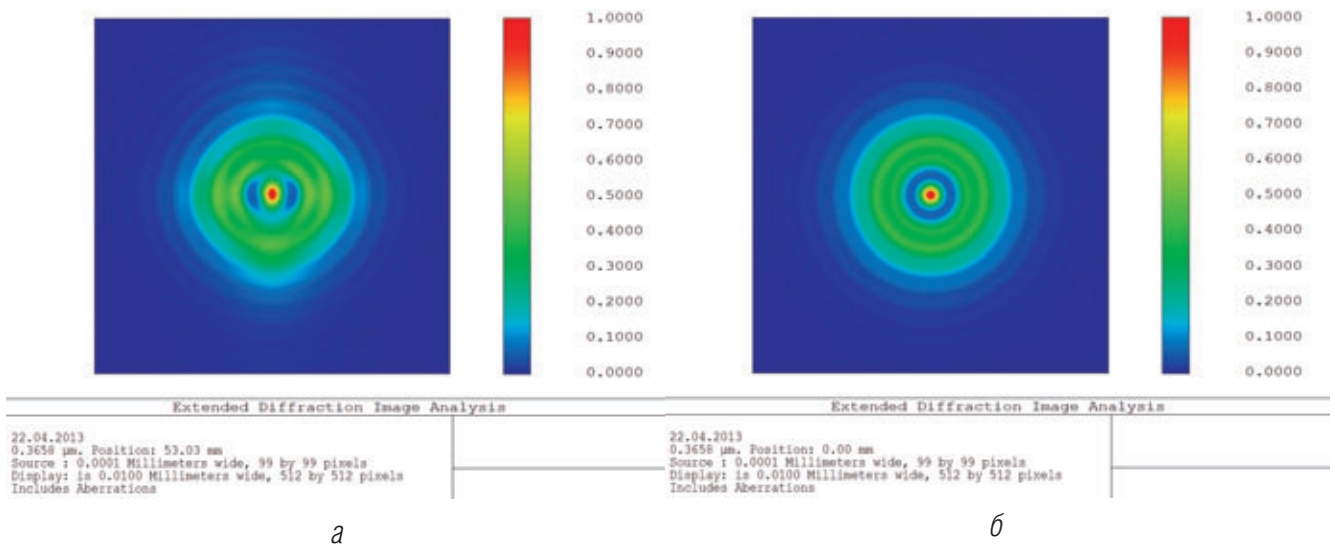


Рис. 9. Внефокальные изображения точки оптимизированного объектива для центра поля зрения (а) и на линейной дистанции 10,6 мм (б)

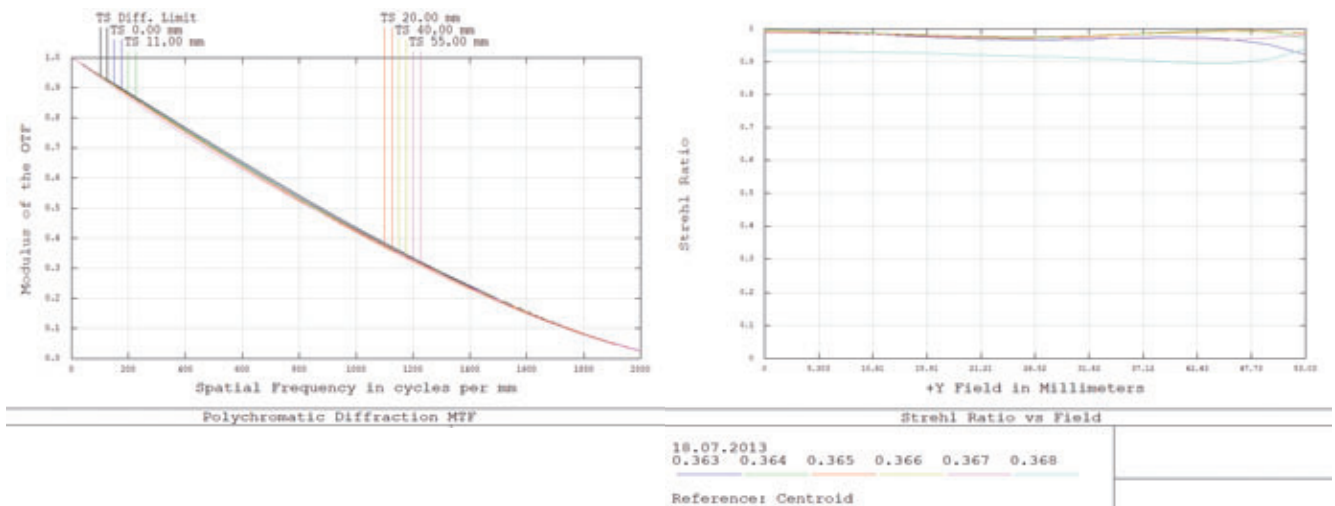


Рис. 10. Графики передаточной функции объектива с асферическим компонентом

Рис. 11. Графики числа Штреля для рабочих длин волн оптимизированного объектива с асферическим компонентом

для корректного проведения точных литографических процессов. В расчёте предложенного объектива на финальном этапе, помимо критерия, основанного на числе Штреля, применялись также другие критерии, основанные на профиле поперечного распределения фокального и внефокального пятен системы, что позволило полностью решить поставленную задачу.

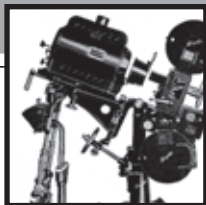
Отметим, что в настоящее время технология литографического процесса достигла своего теоретического предела по критерию разрешающей способности. Дальнейшее уменьшение технологического процесса (не относится к другим методам) приводит к значительному ухудшению качества получаемых изделий. Тем не менее, спрос на оптическую литографию (в том числе, микростереолитографию) продолжает расти, что связано как с понижением себестоимости изделий, так и с применениями в области силовой электроники.

Заключение

В настоящее время ведётся разработка улучшенных версий проекционных литографических объективов со встроенными корректорами локальных aberrаций. Реализация данных разработок производится по контрактам в США и в некоторых странах ЕС. На территории Российской Федерации реализация даже простейших вариантов проекционных литографических объективов ультрафиолетового диапазона, с учётом предъявляемых требований к ним, технологически невозможна (надеюсь, что только пока).

ЛИТЕРАТУРА

1. Milton Laikin. «Lens Design», Fourth Edition, CRC Press, 2006.
2. Патент США 8, 314, 922 (Nov. 20, 2012).
3. Бирючинский С.Б. Киносъёмочные стереообъективы высокой чёткости // МТК, 2009, № 13. С. 19–22.



СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СВОЙСТВ ПИЩЕВОГО И ИНЕРТНОГО ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ЖЕЛАТИНА

А.С. Михайлов, к.т.н.,
М.А. Сакварелидзе, д.х.н.,
Д.И. Толкунов, МКВИ
(филиал СПбГУКИТ)



Аннотация

Исследована возможность замены фотографического желатина на желатин пищевой категории в светочувствительных слоях кинофотоматериалов. Проведены сравнительные испытания сенситометрических характеристик светочувствительных слоёв, содержащих различные образцы желатин, а также рассмотрено влияние продолжительности хранения эмульсии с различными типами желатин на сенситометрические характеристики. Полученные результаты могут иметь большое практическое значение в технологии производства и эксплуатации кинофотоматериалов.

Ключевые слова: пищевой желатин, инертный желатин, химическая сенсibilизация, спектральная сенсibilизация, сенситометрические характеристики.

Введение

В связи с тем, что в настоящее время в России отсутствует производство фотографических желатин, тогда как сами светочувствительные материалы продолжают выпускаться (ПО «ТАСМА», «СЛАВИЧ»), возникла необходимость рассмотреть возможность замены фотографического желатина на желатин пищевой категории.

Проведённые ранее исследования [1,2] показали принципиальную возможность использования пищевого желатина в качестве альтернативной замены фотографических желатин для изготовления светочувствительных слоёв. В настоящей статье представлены материалы дальнейших исследований по изучению свойств пищевого желатина марки П-17 и, в частности, проведены

COMPARATIVE TESTS OF PROPERTIES OF THE FOOD AND INERT PHOTOGRAPHIC GELATIN

A. Mikhailov, M. Sakvarelidze, D. Tolkunov

Abstract

Investigated a possibility of replacing the photographic gelatin for edible gelatin in the light-sensitive layers. Carried out comparative tests of sensitometric characteristics of light-sensitive layers containing different samples of gelatin and also consider the influence of the storage duration of emulsions with different types of gelatin on its sensitometric characteristics. Obtained results can have a great practical value in the technology of production and exploitation of film photographic materials.

Keywords: edible gelatin, inert gelatin, chemical sensitization, sensitometric characteristics.

сравнительные испытания по химической и спектральной сенсibilизации, а также рассмотрено влияние продолжительности хранения фотографической эмульсии на её сенситометрические характеристики.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований были использованы инертные фотографические желатины № 25866 (производства Казанского фотожелатинового завода КФЖЗ), № L9886 (Бельгия) и пищевой желатин марки П-17 № 4871 (производства «Можелит», республика Беларусь). Синтез образцов фотографических эмульсий с применением данных образцов желатин проводили с использованием рецептуры безаммиачной кинонегатив-

Табл. 1. Характеристики фотоземлюсии

Средний размер МК, мкм	Коэффициент вариации, %	Содержание AgI, моль, %	Содержание Ag, г/кг эмульсии	$\rho (C_{\text{желат.}}/C_{\text{Ag}})$	pBr	pH
0,6	60	6,9	48 ±2	1,3	2,8±0,1	6,2±0,2

Табл. 2. Результаты химической сенсibilизации синтезированных фотоземлюсий

Тип желатина	Вводимые компоненты в мл на 100 г эмульсии. Температура химической сенсibilизации	Сенситометрические характеристики	Продолжительность химической сенсibilизации, мин								
			0	60	90	120	150	180	240	300	
Фото (инертный) № 25866	Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O – 1,5 HAuCl ₄ – 0,2 50° С	S _{0,1}	2,1	5,6		10,4			14,5	22,4	23,0
		S _{0,2}	1,2	4,0		9,0			10,5	16,0	17,0
		γ	0,50	0,96		1,10			1,11	1,11	1,10
		D ₀ +D _{осн.}	0,05	0,09		0,11			0,10	0,13	0,16
Фото (инертный) № L9886	Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O – 1,5 HAuCl ₄ – 0,2 Na-БСК – 4,0 50° С	S _{0,1}	2,2	8,8	16,8	18,4	22,0	26,0			
		S _{0,2}	1,5	7,0	13,0	13,6	17,5	18,8			
		γ	0,73	0,70	0,82	0,90	0,91	0,95			
		D ₀ +D _{осн.}	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07	0,08			
Пищевой П-17 № 4871	Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O – 1,5 HAuCl ₄ – 0,2 KSCN – 1,0 57° С	S _{0,1}	1,4	25,6	24,1	24,0	–				
		S _{0,2}	1,0	17,0	19,0	16,5	–				
		γ	0,50	1,12	1,18	1,27	–				
		D ₀ +D _{осн.}	0,04	0,06	0,07	0,18	0,75				

Примечание. Использовались растворы в концентрациях:

- тиосульфат натрия кристаллический (Na₂S₂O₃·5H₂O) – 0,1% раствор;
- золотохлористоводородная кислота (HAuCl₄) – 0,08% раствор;
- тиоцианат калия (KSCN) – 1% раствор;
- натрий бензолсульфиновоксиловый (Na-БСК) – 40% раствор.

Сенситометрические параметры: светочувствительность (S_{0,1}, S_{0,2}), коэффициент контрастности (γ), оптическая плотность вуали (D₀).

ной эмульсии. Для поддержания постоянства свойств микрокристаллов (МК) галогенида серебра, не зависящих от свойств использованного типа желатина, синтез эмульсии проводили на одном типе желатина (инертный, № 25866). Выделение твердой фазы AgI проводили натриевой солью полистиролсульфонокислоты при pH 4,7±0,3. Промытый осадок диспергировали в свежем растворе испытуемого желатина. Некоторые характеристики полученной фотоземлюсии представлены в таблице 1.

При проведении кинетики химической сенсibilизации пробы эмульсии отбирали через определённые промежутки времени в количестве 1 мл, смешивали с 4 мл 6% раствора желатина и поливали на подслоированные стеклянные пластинки форматом 9x12 см. Высушенные пластинки экспонировали в соответствии с ГОСТ 10691.0-84–10691.3-84 на сенситометре ФСР-41 при T_{цв.}=5500 К и выдержке 0,05 с.

Проявление экспонированных пластинок проводили в стандартном кинонегативном проявителе № 5 в течение

10 мин. при температуре 20±0,5° С, с последующим фиксированием в стандартном кислом фиксаже и промывкой в проточной воде в течение 15 мин. Сенситограммы измеряли на денситометре ДП-1М с последующим построением характеристических кривых на стандартных сенситометрических бланках. При определении светочувствительности S использовали критерии 0,1 (0,8/Н) и 0,2 (1/Н).

Результаты химической сенсibilизации синтезированных фотоземлюсий

С целью достижения максимально близких сенситометрических показателей эмульсий, изготовленных с использованием различных образцов желатин, были подобраны оптимальные условия их химической сенсibilизации, как по добавкам сенсibilизации, так и по термовременному режиму. В табл. 2 представлены результаты химической сенсibilизации образцов эмульсий и условия, при которых они были достигнуты.

Табл. 3. Сенситометрические характеристики фотоэмульсий с различными типами желатин

Тип желатина	Продолжительность химической сенсibilизации, мин.	Сенситометрические характеристики			
		$S_{0,1}$	$S_{0,2}$	γ	$D_0 + D_{осн}$
№ 25866	270	23,2	18,0	0,90	0,12
№ L9886	180	26,4	19,0	0,95	0,06
П-17	90	22,0	16,0	1,18	0,08

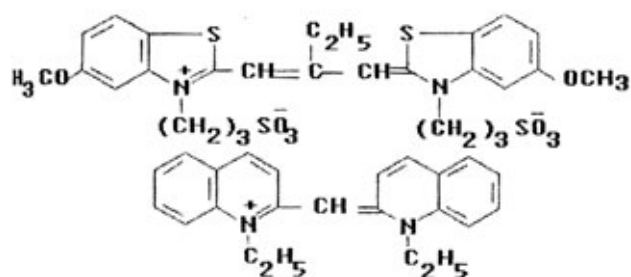
По результатам кинетики химической сенсibilизации были сенсibilизированы оставшиеся количества эмульсий для проведения с ними дальнейшей работы (табл. 3).

Как видно из представленных данных табл. 3, на всех образцах эмульсий, содержащих исследованные типы желатин, получены практически сходные результаты. Несколько лучшее соотношение светочувствительности и вуали получено на эмульсии, содержащей инертный желатин L9886. Но при этом следует отметить, что одним из факторов, позволивших получить такое соотношение, является использование антивуалирующего вещества Na-БСК. При его отсутствии требуемый уровень светочувствительности негативной киноплёнки (не менее 20 ед. по критерию 0,1) мог быть достигнут при значительно более высоком уровне вуали (0,23–0,25).

Результаты спектральной сенсibilизации

Для рассмотрения влияния типа желатина на процесс спектральной сенсibilизации фотографической эмульсии были использованы следующие карбоцианиновые красители.

Краситель № 1

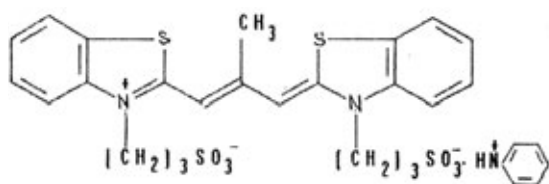


Соль 3,3'-ди- γ -сульфопропил-9-этил-5,5'-диметокси-тиакарбоцианинбетаина и 1,1'-диэтил-2,2'-хиноцианина.

Зона сенсibilизации: 500–680 нм.

Граница сенсibilизации: 680 нм.

Краситель № 2



Пиридиновая соль 3,3'-ди- γ -сульфопропил-9-метил-тиакарбоцианинбетаина.

Зона сенсibilизации: 520–640 нм.

Граница сенсibilизации: 640 нм.

Красители вводили в эмульсию в виде 0,05% спиртовых растворов. После введения первого раствора красителя эмульсия выстаивалась в течение 5 мин, затем после введения следующего раствора красителя эмульсия снова выстаивалась не менее 10 мин и поливалась на пластинку. Для обеспечения необходимого наноса серебра в эмульсию дополнительно вводили 7% желатиновый раствор. При испытаниях спектрально сенсibilизированных пластинок, для определения эффективности процесса сенсibilизации в различных зонах спектра, экспонирование на сенситометре проводили с использованием стандартных цветных светофильтров ЖС-18, ОС-14 и КС-14. Кроме того, для выявления процесса десенсibilизации проводили экспонирование за синим светофильтром СС-5.

Предварительно для эмульсии, изготовленной с применением инертного желатина № 25866 (КФЖЗ), были проведены испытания по подбору оптимальных количеств красителей, обеспечивающих как достижение максимально возможной светочувствительности, так и необходимой эффективной светочувствительности, соответствующей требованиям к негативной киноплёнке. Как будет показано ниже, подобранные для эмульсии с желатином № 25866 (партия № 1) количества красителей оказались оптимальными и для эмульсии с инертным желатином № L9886 (партия № 2), тогда как для эмульсии, содержащей пищевой желатин П-17, выбранное количество красителей оказалось недостаточным. Кроме того, было установлено, что в случае эмульсии, изготовленной с использованием желатина П-17 (партия № 3), эффективность спектральной сенсibilизации была недостаточна, а уровень вуали повышен, что могло быть из-за старения фотоэмульсии в процессе хранения. Поэтому, для определения эффективности процесса спектральной сенсibilизации, была дополнительно синтезирована ещё одна партия фотоэмульсии с использованием желатина П-17 по аналогии с предыдущей партией. Хотя новая партия (№ 4) эмульсии получилась с несколько меньшим уровнем светочувствительности (табл. 3 и 4), тем не менее, она была использована для изучения спектральной сенсibilизации. Результаты испытаний спектрально сенсibilизированных образцов материалов представлены в таблице 5.

В табл. 6 приведены данные по эффективности спектральной сенсibilизации (K), которую определяли как отношение общей светочувствительности спектрально сенсibilизированной ($S_{с.с.}$) эмульсии к исходной свето-

Табл. 4. Сенситометрические характеристики эмульсии, содержащей пищевой желатин

Тип желатина	Продолжительность химической сенсibilизации, мин.	Сенситометрические характеристики			
		$S_{0,1}$	$S_{0,2}$	γ	$D_0 + D_{осн}$
П-17 (партия №4)	90	17	12	1,03	0,05

Табл. 5. Характеристики сенсibilизированных фотоземульсий

Вводимые красители, мл на 100 г эмульсии. Тип желатина	Параметры	Сенситометрические характеристики за светофильтрами					Эффективная светочувствительность, %, за светофильтрами			
		дневного света 5500 К (общий)	5500 К + фильтр				СС-5	ЖС-18	ОС-14	КС-14
			СС-5	ЖС-18	ОС-14	КС-14				
№ 1 – 9,0 № 2 – 9,0 КФЖЗ № 25866	$S_{0,1}$	46,6	12,8	24,0	11,2	1,8	27,5	51,5	24,0	3,9
	$S_{0,2}$	24,0	10,0	18,0	9,0	1,4				
	γ	1,17	1,04	1,26	1,18	1,09				
	$D_0 + D_{осн}$	0,14								
№ 1 – 9,0 № 2 – 9,0 L9886 (Бельгия)	$S_{0,1}$	43,2	12,8	18,4	10,4	1,6	29,6	42,6	24,6	3,7
	$S_{0,2}$	34,0	10,0	14,0	7,0	0,9				
	γ	1,17	1,07	1,20	1,08	0,95				
	$D_0 + D_{осн}$	0,11								
№ 1 – 11,3 № 2 – 11,3 П-17 (Можелил)	$S_{0,1}$	29,0	7,6	20,0	12,0	2,0	26,2	69,0	41,4	6,9
	$S_{0,2}$	20,0	5,0	15,0	8,5	1,5				
	γ	1,50	0,95	1,03	0,95	1,04				
	$D_0 + D_{осн}$	0,15								

Табл. 6. Эффективность спектральной сенсibilизации (К)

Тип желатина и суммарное количество растворов красителей на 100 г эмульсии	КФЖЗ, № 25866 18,0	L9886 18,0	П-17 (повторно) 18,0	П-17 (повторно) 22,6
$S_{с.с.}$	46,6	43,2	24,5	29,0
$S_{исх.}$	23,2	26,4	17,0	17,0
К	2,0	1,6	1,4	1,7

чувствительности эмульсии до её спектральной сенсibilизации ($S_{исх.}$).

Как видно из данных табл. 6, выбранные количества красителей оказались недостаточными для эмульсии на основе желатина П-17. Увеличение количества вводимых красителей на 12,5 % позволило получить лучшую эффективность спектральной сенсibilизации и, соответственно, более высокие значения интегральной светочувствительности. Но при этом, как видно из данных табл. 5, эффективная светочувствительность за красным фильтром КС-14 (6,9) существенно превысила значение, которое было достигнуто на первых двух эмульсиях, что применительно к негативным киноплёнкам является нежелательным.

Изучение продолжительности хранения фотоземульсии в зависимости от типа использованного желатина

Поскольку при проведении экспериментальной работы наблюдалось снижение светочувствительности фотоземульсии, изготовленной на пищевом желатине, были проведены дополнительные опыты по изучению сохраняемости эмульсий, изготовленных на всех трёх типах использованных желатин. Результаты изменения сенситометрических характеристик в зависимости от продолжительности времени хранения образцов эмульсий представлены в табл. 7 и на рис. 1.

Как следует из представленных материалов, фотоземульсия на основе инертного желатина КФЖЗ № 25866 обеспе-

Табл. 7. Результаты изменения сенситометрических характеристик в зависимости от продолжительности времени хранения образцов фотоземльсий

Тип желатина	Параметры	Продолжительность хранения эмульсии (дни)									
		1	6	13	20	27	30	35	40	46	60
КФЖЗ № 25866 (партия 1)	$S_{0,1}$	23					25,5				28,0
	$S_{0,2}$	18					17,5				17,0
	γ	0,90					1,10				1,15
	$D_0+D_{осн.}$	0,12					0,11				0,08
L9886 (партия 2)	$S_{0,1}$	26,4			28,0				22,4	20,8	
	$S_{0,2}$	19,0			21,0				14,0	16,0	
	γ	0,95			1,05				1,19	0,83	
	$D_0+D_{осн.}$	0,06			0,07				0,12	0,07	
П-17 № 4871 (партия 4)	$S_{0,1}$	17,0	20,4	18,4		11,0		10,1			
	$S_{0,2}$	12,0	14,0	13,0		9,0		8,0			
	γ	1,03	1,9	1,20		1,09		1,01			
	$D_0+D_{осн.}$	0,05	0,12	0,07		0,05		0,06			

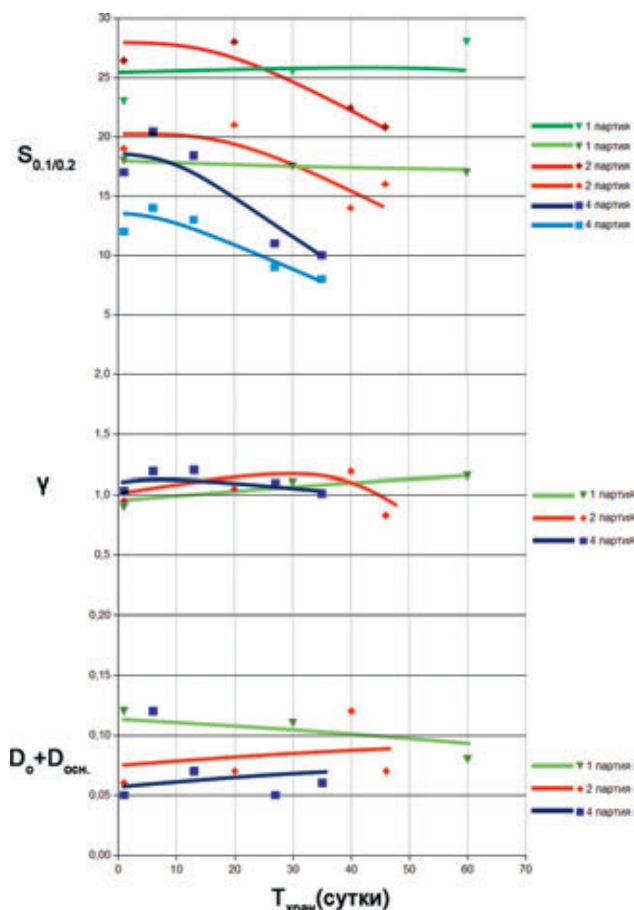


Рис. 1. Влияние продолжительности хранения фотоземльсии на сенситометрические характеристики

чивает стабильность сенситометрических характеристик до двух месяцев хранения. Эмульсия на основе бельгийского желатина L9886 может храниться до одного месяца.

Эмульсия на основе пищевого желатина П-17 обеспечивает стабильность сенситометрических характеристик в течение не более двух недель. Такой срок хранения эмульсии для производства фотоматериалов, как правило, недостаточен и может создавать определённые сложности.

Заключение

Таким образом, по результатам проделанной работы установлено, что пищевой желатин может быть использован в технологии кинофотоматериалов, но с обязательной корректировкой условий химической и спектральной сенсibilизации. Кроме того, необходимо иметь в виду ограниченные сроки хранения эмульсии, изготовленной на основе пищевого желатина. Для окончательного решения вопроса о применении пищевого желатина в технологии кинофотоматериалов в качестве альтернативного заменителя фотографического инертного желатина необходимо исследовать влияние различных партий желатина П-17 на стабильность сенситометрических показателей фотографических эмульсий. Кроме того, большое практическое значение имеет изучение сохраняемости свойств фотографических материалов, изготовленных на различных партиях пищевого желатина, при архивном хранении. ■

(статья подписана к вёрстке 20 октября 2013 г.)

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А.С., Сакварелидзе М.А., Орурк О.И. Пищевые желатины в качестве альтернативы фотографическому желатину. МТК, 2012, № 1 (23), с. 29–35.
2. Бульчев Э.Ю., Гапонова В.Е., Шапиро Б.И., Михайлов А.С. Разработка нового способа получения фотографического желатина. Вестник МИТХТ, 2010. Т. 5, вып. 2, с. 69–72.



ТРЁХМЕРНОЕ ВИДЕО С КONTИНУАЛЬНЫМ РАКУРСОМ: съёмка, модель и отображение

А. Жирков, к.ф.-м.н.,
А. Путилин, к.ф.-м.н.,
ФИАН



(Окончание. Начало в МТК № 29)

Обобщение дискретных моделей: зависимый от ракурса цвет поверхности

Реалистичность отображения подразумевает, что цвет поверхности объектов будет меняться в зависимости от ракурса просмотра. Допущение, что материал объектов сцены полностью диффузный/матовый, уменьшает реалистичность визуализации, а значит, не может считаться полностью фотореалистичным и не позволит достичь поставленной цели. Отказ от предположения использования диффузных поверхностей приводит к существенному усложнению модели. Для решения этой задачи существует два подхода: условно, от модели поверхности и от изображений сцены. Рассмотрим вкратце оба подхода.

В первом подходе рассматривается модель освещения, которая исходит из общего закона равенства входной и выходной энергии в некотором участке пространства. Или иначе, выходная энергия $L_{\text{выход}}$ равна сумме излучённой $L_{\text{излуч}}$, отражённой $L_{\text{отраж}}$ и пропущенной $L_{\text{пропуск}}$. Относительно точки $v = (x, y, z)$ выходная энергия в направлении (θ, ϕ) будет равна:

$$L_{\text{выход}}(v, \theta, \phi) = L_{\text{излуч}}(v, \theta, \phi) + L_{\text{отраж}}(v, \theta, \phi) + L_{\text{пропуск}}(v, \theta, \phi) = (1)$$

$$= L_{\text{вылуч}}(v, \theta, \phi) + \iint_{\Omega} k(v, \theta, \phi, \theta', \phi') L_{\text{вход}}(v, \theta', \phi') d\theta' d\phi'$$

где интегрирование ведётся по всем входящим углам Ω , а функция $k(x, y, z, \theta, \phi, \theta', \phi')$ является функцией, определяющей физические свойства точки $v = (x, y, z)$ пространства при выходящем луче (θ, ϕ) и входящем луче (θ', ϕ') . Применительно к поверхности эту функцию разделяют на две – двулучевую функцию рассеивающей

способности BRDF и двулучевую функцию пропускающей способности BTDF. Первая определена для выходящих лучей, отражающихся от поверхности, вторая – проходящих сквозь неё.

На основе функции BRDF определяют, так называемое, уравнение рендеринга, выглядящее следующим образом:

$$L_{\text{выход}}(v, \theta, \phi) = L_{\text{излуч}}(v, \theta, \phi) + \iint_{\Omega} BRDF(v, \theta, \phi, \theta', \phi') \cos \angle((\theta, \phi), \vec{n}(v)) L_{\text{вход}}(h(v, \theta', \phi'), \theta', \phi') d\theta' d\phi' (2)$$

где v – координатный вектор (x, y, z) ; функция h определяет координаты точки поверхности сцены, видимой из заданной точки в заданном направлении; n – нормаль к поверхности в заданной точке. Данное уравнение определяет яркость поверхности в точке по заданному направлению, которая равна сумме яркостей излученного света и света, пришедшего в точку со всех направлений в соответствии с BRDF поверхности. Данное уравнение не решается в общем виде аналитически, поэтому в реальности для моделирования освещённости часто используют численное интегрирование на основе случайных или квази-случайных выборок методом Монте-Карло [14].

Во втором подходе рассматривается, так называемая, плентоптик функция – *plenoptic function* [5]. Это пятимерная функция, которая определяет излучение света в данной точке трёхмерного пространства в любом направлении. Сами изображения в *плентоптик функции* являются её сечениями. Другим названием (по сути, той же функции) является *световое поле (light field)*. Для сокращения объёма и возможности представить эти функции в памяти компьютера используют функции, редуцированные до четырёхмерности – 4D световое поле [4]. Для осуществления редукции пространства используют предполо-

жение, что вдоль луча, проходящего через пустое пространство, цвет не меняется. Это множество параметризуется путём указания луча, проходящего через две плоскости, расположенные на расстоянии.

Применительно к решаемой задаче невозможно использовать ни первый, ни второй подход в чистом виде. В первом подходе необходимо знать BRDF свойства поверхностей и источники освещения, о которых в общем случае ничего не известно. Во втором подходе необходимо знать функцию светового поля.

Наиболее близким к световому полю в физической записи является голографическая запись. Однако, даже в предположении, что у нас имеется голографическая кинозапись [3], и мы запишем каждый её кадр цифровым способом в виде 4D светового поля, это нарушит требование компактности представления – цифровое представление будет, как минимум, в десятки тысяч раз больше, чем цифровое сжатое представление обычного двухмерного видео. Т.е. возможности передачи таких объёмов потоковых данных, даже учитывая постоянный рост скорости передачи информации по сети, в обозримом будущем не предвидится.

Выходом из этого тупика является использование гибридного подхода, а именно метода, включающего и поверхность объектов сцены, и изображений самой сцены. Эффективной реализацией этой идеи считается подход *поверхностных световых полей (surface light fields)* [15], для которого были разработаны эффективные алгоритмы сжатия [16]. В этом подходе поверхность объекта вначале приближается полигональной геометрией, а световое поле на полигонах аппроксимируется суммой произведений двух карт. Первая карта – карта зависимости освещённости от направления наблюдения, а вторая – карта зависимости освещённости от локальных координат на полигоне.

В отличие от метода *поверхностных световых полей*, нами предложен метод [12], работающий в пространстве дискретных, а не непрерывных/полигональных моделей. Приведём здесь основную предложенную интерполяционную формулу для вычисления светового поля:

$$L(v, \theta, \phi) = \sum_{i=1}^N \frac{K_i(v, \theta, \phi)}{\sum_{j=1}^N K_j(v, \theta, \phi)} f_i \quad (3)$$

$$K_i(v, \theta, \phi) = \delta_{coord}(\rho_{coord}(v, v_i)) \delta_{dir}(\rho_{dir}((\theta, \phi), (\theta_i, \phi_i))) \cos \angle((\theta, \phi), \vec{n}(v))$$



Рис. 4. Предложенный метод вычисления светового поля по сравнению с обычной точечной визуализацией в случае существенной ракурсообразности цвета поверхности

где $\{v_i = (x_i, y_i, z_i), \theta_i, \phi_i, f_i, k_i\}$ – известные дискретные значения светового поля; N – количество членов, участвующих в интерполяции, обычно от 1 до 10; ρ_{coord} , ρ_{dir} – мера расстояний между координатами и углами, соответственно; δ_{coord} , δ_{dir} – радиальные функции координат и углов, соответственно, могут меняться от тождественной константы до дельта-функции. Важный частный случай $\delta_{dir} \equiv const$ используется для перевода из октоизображения в объект с чисто диффузным отражением – в раскрашенное октодереве.

Результаты работы данного метода видны на рис 4. Заметим, что предложенный метод вычислительно сложный, особенно метод получения $K_i(v, \theta, \phi)$, поэтому перед отображением те элементы формул, которые не изменяются во время визуализации, предвычисляются и на этапе визуализации используются в табличном виде. В случае трёхмерного видео такой препроцессинг придётся делать для каждого кадра, что приведёт к противоречию с требованием реального масштаба времени. Одним из методов удовлетворения данному требованию является использование параллельных вычислений.

Методы отображения континуального ракурса

Отображение информации, получаемой при описываемом методе, является достаточно сложной задачей, поскольку потенциальный поток информации, во-первых, зависит от положения зрителя и, во-вторых, требует реконфигурации собственно оптической системы отображения дисплея. Вообще, задача отображения 3D информации в части построения оптической схемы обработки потока информации сводится к достаточно хорошо изученным схемам оптических вычислительных устройств [17], хотя любая оптическая система, имеющая в качестве анализатора человека, будет не идеальна, поскольку зри-

Автостереоскопические дисплеи как пространственно-временные преобразователи

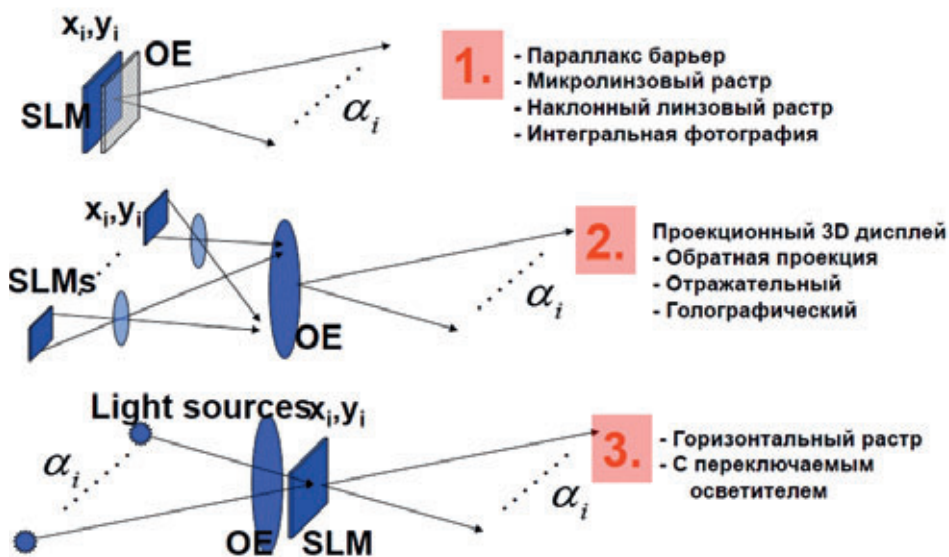


Рис. 5. Классификация автостереоскопических систем

Видео с каналом глубины



Рис. 6. Практический результат: видео с каналом глубины, снятое устройством Kinect [2], модель – октоизображение, полученное с использованием алгоритмов фильтрации и апсэмплинга

тельный аппарат человека не только очень сложен, но и ещё идеально адаптирован для естественной земной жизни с её изменчивостью и многообразием. Любая попытка «обмануть» естественное человеческое зрение может иметь успех в ограниченных условиях и при определённых допущениях. Достаточно остро в этом смысле стоит проблема согласования аккомодации и конвергенции при 3D отображении. При этом следует отметить, что только чисто голографическая схема и волюметрический способ построения 3D свободны от этой проблемы, и то для ограниченных классов 3D объектов и сцен [18].

Перед выбором схемы построения 3D дисплея требуется практически определить схему уплотнения оптической информации, исходя из функциональности разрабатываемого дисплея и применяемых оптических элементов и методов. На рис. 5 показаны несколько базовых оптических схем построения различных видов 3D дисплеев, сгруппированных по способу уплотнения информации. Первая схема базируется на пространственном уплотнении информационного потока для различных зрителей в области общего большего информационного дисплея. Структурирование пространства отображения при этом достигается оптическими элементами в виде растров [19]. Вторая схема производит структурирование пространства в виде проекционной системы с пространственным уплотнением информации, формируемой серией компактных 2D дисплеев. Третья схема – переходная, структурирует пространство по типу проекционной схемы, но структурирование достигается только для осветительной системы, а отображение всего потока информации производится на едином SLM, как в первой схеме.

Существуют и другие классификации, исходящие либо из функциональности дисплеев (consumer classification), либо из технологии активных элементов (technology classification), однако приведённая здесь классификация схем построения 3D дисплеев исходит из анализа оптических схем и в этом смысле более привязана к принципам построения дисплеев, чем к конкретным экспериментам, что полезно в конкретном случае выбора схемы для дисплея континуального ракурса.

Анализ схем отображения 3D информации показал, что наиболее адекватным решением может оказаться схема

3D моделирование по одной фотографии



Плюс: фотореалистичность

Минусы:

- участие человека в создании модели (не объективность)
- статичность
- малая область фотореалистичного континуального ракурса

Рис. 7. Практический результат: 3D моделирование по одной фотографии, модель – октоизображение плюс фон и канал прозрачности

Многоракурсное («3D») фото



Плюсы:

- фотореалистичность
- возможность удаленного просмотра в интернет-браузере

Минусы:

- статичность
- континуальность ракурса достигается только при вращении не ниже определенной скорости
- интерактивности ограничена одним измерением

Рис. 8. Практический результат: многоракурсное/3D фото с 200 ракурсами, снято методом вращения объекта с последующим полуавтоматическим удалением фона

типа 2 из приведённой классификации, адаптированная для конкретного информационного потока. Необходимо отметить, что проекционные схемы, хотя и плохо интегрируются в планарные конструкции, хорошо масштабируются, и, кроме того, процесс обработки информации может быть распараллелен по отдельным 2D каналам.

Практические результаты: съёмка, модель и отображение трёхмерного видео

Среди рассмотренных в начале статьи подходов к континуальному ракурсу, с точки зрения съёмки контента и его модели, было реализовано три подхода: видео с каналом глубины (рис. 6), 3D моделирование по фотографии (рис. 7) и многоракурсное/3D фото (рис. 8).

Как и было предсказано теорией, каждый из реализованных подходов обладает своими недостатками с точки зрения сформулированной цели. Видео с каналом глубины содержит геометрические дырки при существенном изменении ракурса от исходного, а также содержит массу артефактов ввиду несовершенства сенсора, снимающего канал глубины. 3D моделирование по фотографии требует ручной работы, статично, и при внимательном взгляде, используя континуальный ракурс, можно обнаружить синтетичность визуализации синтезируемых ракурсов. Многоракурсное фото ограничено только 1D интерактивностью. Ввиду наличия достаточно большого количества ракурсов, при вращении многоракурсного фото со скоростью, не медленнее определённого порога, создаётся иллюзия плавности, т.е. многоракурсность воспринимается как континуальноракурсность.

С точки зрения отображения, была разработана схема с адаптивным дисплеем, т.е. была реализована проверка концепции дисплея с континуальным отображением по схеме II (рис. 6). Общая оптическая схема дисплея представлена на рис. 9. Пара микропроекторов образует стереомикропроектор для отображения 3D индивидуальной

Канал единичной стереопроекции

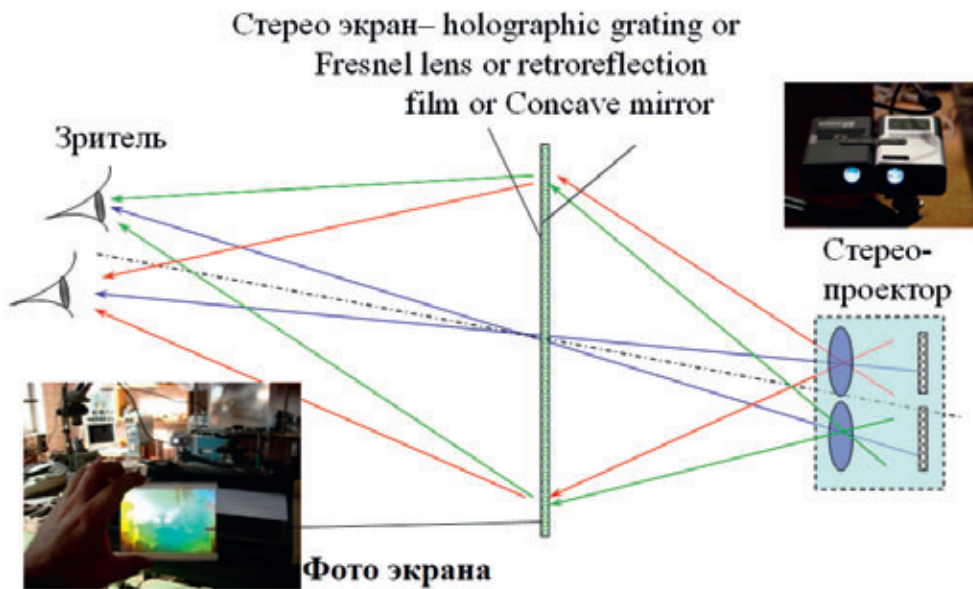


Рис. 9. Практический результат: экспериментальная установка с непрерывным ракурсом (оптическая схема)

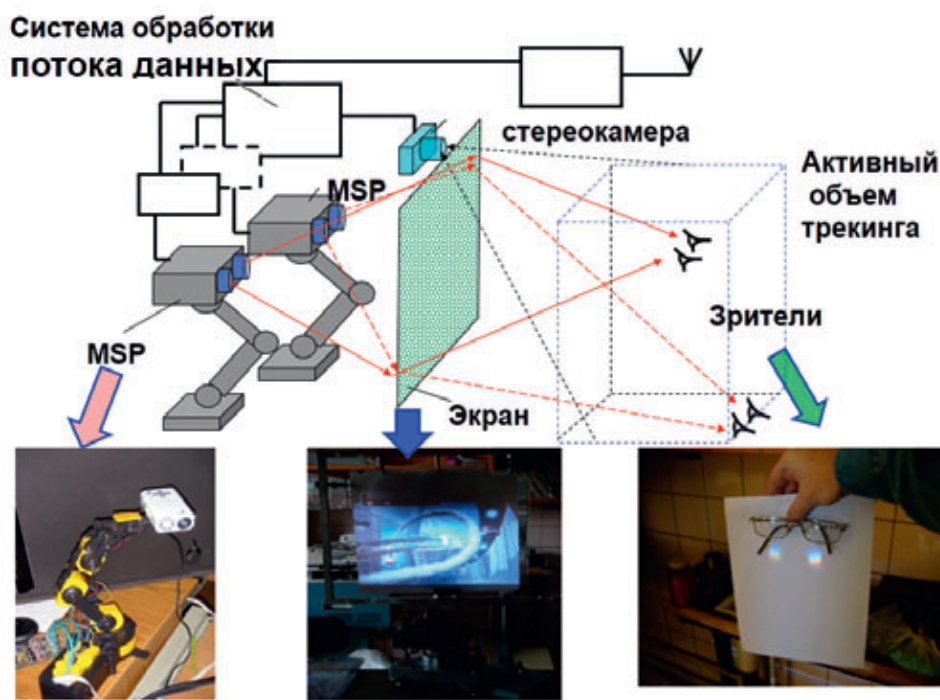


Рис. 10. Практический результат: экспериментальная установка с непрерывным ракурсом (общая схема)

информации каждому зрителю. В идеале согласованная пара проекторов должна иметь необходимые средства настройки изображения по фокусу, азимуту отображения и масштабированию расстояния между проекторами. Ключевым элементом схемы является стереоэкран. Нами использовался голографический экран, впрочем,

делает проблему аккомодации-конвергенции минимально острой.

Особенностью такого построения дисплея с индивидуальной адаптивной перестройкой оптической схемы является высокая световая эффективность схемы. Достаточно сказать, что мощность источников света ми-

может быть использована и френелевская линза или вогнутое зеркало. Во всех случаях экран образует оптически сопряжённое пространство проекторов и зрителей, как обычная рефракционная линза, то есть апертура проекторов экраном оптически отображается в области расположения глаз зрителя.

Схема работы единичного канала стереопроекции выглядит следующим образом: система слежения за положением зрителей вычисляет положение глаз конкретного зрителя и передаёт процессорному блоку информацию о пространственных параметрах отображаемой информации. Одновременно, согласно этим параметрам, происходит перемещение (перенастройка оптической системы) стереомикропроекторов (MSP) в сопряжённую с положением зрителя точку пространства проекторов. Процессорный блок пересчитывает поток информации для отображения согласно новому положению зрителя. Таким образом, зритель постоянно получает информацию того информационного потока, который согласован именно с его положением. В реальности это очень близко к реальному 3D отображению, исключая проблему аккомодации-конвергенции, однако проекционная схема построения такого дисплея в сочетании с технологией голографического экрана

кропоекторов лежит в пределах единиц люмен. При точности отслеживания положения глаз зрителя в 2 см световая энергия в схеме используется максимально эффективно, поскольку световой поток формируется только в тех направлениях, где есть зритель, то есть потенциально системы адаптивного отображения могут до 10000 раз улучшить световой КПД оптических схем (вместо тысяч люмен проекторы выдают единицы люмен). Размер экрана может достигать нескольких метров. Другой особенностью схемы является возможность полностью распараллелить не только вычисление потоков информации для каждого зрителя, но также и управление перенастройкой индивидуальных микропроекторов.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 10: микропроекторы (LCOS с разрешением 800x600, световой поток 5 люмен) размещались на подвижной головке двухкоординатного (т.е. способного перемещать подвижную головку в двух направлениях) плоттера или роботехнического манипулятора (типа «механическая рука»), пара фотокамер и видеобабушки использовались в качестве источника информации о положении зрителя. В качестве экрана использовалась голографическая линза или, в другом варианте, линза Френеля с малоугловым голографическим рассеивателем.

Выводы. Направления дальнейших исследований

В ходе работы сформулированы конкретные требования, удовлетворение которых позволяет достичь цели реалистичного отображения трёхмерного видео реального мира. Проанализированы существующие подходы к достижению поставленной цели, в пространстве которых были выбраны векторы движения, позволяющие, по мнению авторов, наиболее быстро приблизиться к поставленной цели. Более подробно рассмотрены выбранные вектора движения и сделаны практические шаги, приведшие к практической реализации схемы с континуальным ракурсом, включающей всю цепочку, начиная от съёмки, формирования модели и отображения.

Анализ полученных практических результатов подтвердил, по нашему мнению, правильность выбранных

подходов. Поэтому, в качестве дальнейших направлений исследований могут быть выбраны подходы, развивающие уже апробированные в нашей работе, а именно:

- **Построение дискретной модели по 3D фото.** Данный подход позволит получить трёхмерную дискретную модель, тем самым увеличить и пространство интерактивности, и сделать синтезированные ракурсы по-настоящему континуальными. При этом в качестве дискретной модели будет выбрано *октоизображение* с предложенным методом вычисления *светового поля*, ускоренного для достижения масштаба реального времени параллельными вычислениями.

- **Съёмка 3D видео с несколькими картами глубины.** В настоящее время на замену используемой нами 3D камеры Kinect, выходит Kinect-2 от компании Microsoft, а также камера Senz3D от компании Intel. Мы надеемся, что использование сразу нескольких камер, снимающих пространство с нескольких ракурсов, устранит существующие недостатки данного направления – видимые разрывы в геометрии и сильные шумы значений глубины в дискретных динамических моделях.

- **Голографический проектор и создание интегрального варианта адаптивного 3D дисплея** – решение проблемы рассогласования аккомодации-конвергенции на этапе отображения.

В заключение заметим, когда наступит, и наступит ли эра «континуального ракурса», прогнозировать сложно. Даже существующее публично более полувека двухракурсное стереокино всё ещё неоднозначно воспринимается широкой публикой, в частности, и из-за несовершенства устройств отображения, и из-за несовершенства технологии стереосъёмки [20], приводящих часто к некомфортности воспринимаемого контента. ■

Благодарности

Благодарим за содействие на разных этапах работы Д. Ватолина, Д. Харабадзе, А. Тяхта и В. Тяхта, а также за финансовую поддержку части выполненной работы компанию Samsung.

ЛИТЕРАТУРА

13. Дмитриев К. Разработка и модернизация методов генерации физически достоверных изображений на ЭВМ. Диссертация, 2002.
14. Keller A. Quasi-monte carlo radiosity // Seventh Eurographics Workshop on Rendering'96 Proceedings, 1996.
15. Wei-Chao Chen, Jean-Yves Bouquet, Michael H. Chu, Radek Grzeszczuk. // Light Field Mapping: Efficient Representation and Hardware Rendering of Surface Light Fields // SIGGRAPH'01 Proceedings, Август 1996.
16. Daniel N. Wood, Daniel I. Azuma, Ken Aldinger, Brian Curless, Tom Duchamp, David H. Salesin, Werner Stuetzle. Surface light fields for 3D photography // SIGGRAPH 2000 In Proceedings, 2000.
17. Jahns J., Lee S.H., Optical Computing Hardware // Academic Press, 1993, p. 332.
18. Мухин И., Путилин А. Безочковые устройства воспроизведения объёмного изображения // Журнал 625, № 06, с. 64-71, 2011.
19. Дудников Ю.А., Рожков Б.К. Растровые системы для получения объёмных изображений // Машиностроение. С. 215, 1986.
20. Voronov A., Vatolin D., Sumin D., Napadovsky V., Borisov A. Methodology for stereoscopic motion-picture quality assessment // SPIE, Stereoscopic Displays and Applications XXIV. Сан-Франциско, США, 2013.



IMAX 3D – ЛЕГЕНДА СТЕРЕОКИНО



| А.С. Мелкумов, ОАО «НИКФИ» |

Аннотация

Зародившись на базе плёночных технологий, компания IMAX в скором времени задействует цифровые технологии и начнёт сдавать позиции высококачественной системы отображения. Причина тому – не столько технический аспект отставания фотографического качества цифрового изображения от плёночного, сколько психологический – несовпадение идеалов изобретателей формата IMAX с маркетинговыми целями менеджеров, пришедших управлять компанией IMAX в начале XXI века. Важна не точность хронологии развития компании, а анализ причинно-следственных связей, приведших к изменению технологии в формате IMAX.

Ключевые слова: стереокино, отжимающий эффект границ кадра, гигантский экран, цифровой ремастеринг.

Стереокино – это вид кинематографа, позволяющий создавать у зрителя ощущение трёхмерности наблюдаемых в кинетике зрительных образов, при котором этот образ может отрываться от плоскости экрана и выходить в зрительный зал, или уходить далеко за экран. Плоскости изображения, как таковой, в восприятии зрителя не существует. Экран как бы растворяется и возникает новое пространственное ощущение, «ощущение воздуха», которое называется *стереопсисом*. Границы изображения «материализуются в раму», как окно в наблюдаемый мир, и пространственное расположение объектов в трёхмерной композиции зритель оценивает по этому окну. Волшебство наблюдения стереоизображения заключается ещё в том, что вы, как зритель с боковых мест, можете даже заглянуть в створ этого «окна» и увидеть уходящее в глубину изображение. Но эта рама накладывает и существенные ограничения для выхода участков пространственной композиции в зальное пространство, которое формулируется

IMAX 3D – LEGEND OF STEREOSCOPIC 3D CINEMA

A. Melkumov

Abstract

Originated on the basis of film technology company, IMAX soon uses digital technology and begin to take positions of high quality imaging systems. The reason for that – not so much the technical aspect of the backlog of photographic quality digital images from the film, much psychological – mismatch ideals inventors IMAX format with marketing objectives of managers who came to run the company IMAX at the beginning of XXI century. Accuracy is important, not the chronology of development and analysis of the cause – effect relationships that led to a change in technology in the format IMAX.

Keywords: stereoscopic 3D cinema, squeeze effect frame borders, giant screen, digitally remastering.

как эффект отжимающего действия границ кадра. Объекты композиции не могут восприниматься зрителем в зале, если они обрезаются или соприкасаются с границами кадра. Со временем был выработан ряд технических и творческих приёмов по преодолению данного эффекта, но самым действенным приёмом является устранение границ кадра из поля зрения зрителя, особенно самой «вредной» – нижней кромки кадра. Для этого необходимо увеличить размер экрана и приблизить к нему зрителя, увеличив тем самым угловые размеры наблюдения немого изображения.

Вопросы расширения экранного изображения были актуальны и для традиционного (плоскостного) кинематографа, которому в 1950-е годы пришлось конкурировать с нарождающимся телевидением. В эпоху плёночных технологий эту задачу нельзя было решить простым проекционным увеличением. Информационная ёмкость стандартного 35-мм плёночного формата и прочитываемая с близкого расстояния структура носителя изобра-



Фото 1. Зрительный зал панорамного кинотеатра «Мир» в г. Москве. Кадр из панорамного фильма «Опасные повороты», Таллиннфильм, 1961 г.

жения не позволяли получить качественный результат. Одним из решений было увеличение количества киноплёнок. Так появилась система «Cinegama», где съёмка и проекция велись с трёх 35-мм плёнок, позволяющих увеличить горизонтальный угол наблюдения до 120 градусов. На фото 1 показан зрительный зал панорамного кинотеатра «Мир» в городе Москве, с изображением на экране кадра из первого в мире полнометражного панорамного фильма «Опасные повороты» производства студии «Таллиннфильм» 1961 года (реконструкция Майорова Н. А.). Трёхплёночные системы демонстрации были уязвимы в синхронизации плёнок и в наличии швов на стыках изображений. По этой причине их вытеснили одноплёночные широкоформатные системы, где использовалась 70-мм киноплёнка с увеличенной шириной в два раза. Обозначение 5/70 описывает формат пятиперфорационного кадра на 70-мм плёнке (фото 2).



Фото 2. Формат 5-перфорационного кадра на 70-мм плёнке (5/70)

В НИКФИ в 60-х годах прошлого века была разработана не только система «Стереo-70», где стереопара из двух 35-мм изображений располагалась на одной 70-мм киноплёнке, но и была разработана двухплёночная стереокамера (фото 3), в которой на двух отдельных 70-мм кинопозитивах регистрировалось по одному ракурсу изображения стереопары высотой кадра

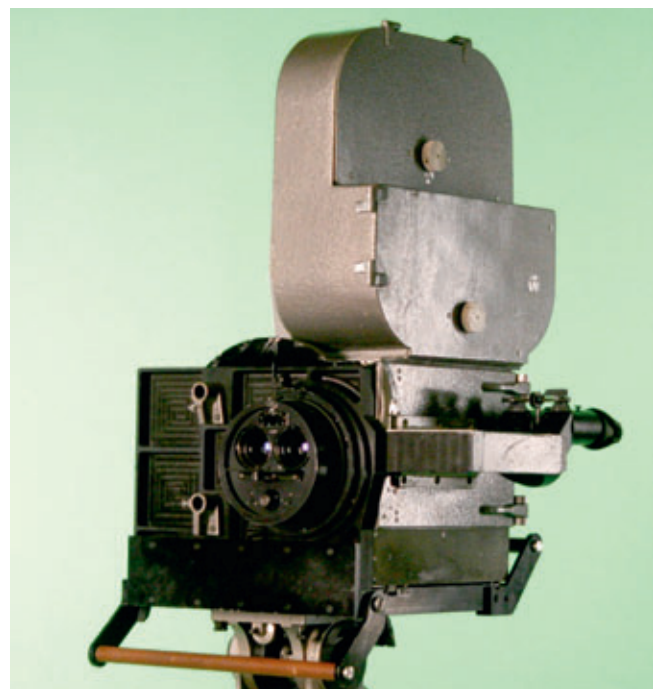


Фото 3. Стереокамера НИКФИ 2x70 (5/70)



Фото 4. Сравнительные размеры кинокадров

Компания IWERKS предложила увеличить высоту кадра до 8 перфораций, что позволило вернуть соотношение сторон экрана до 4:3, более благоприятного для наблюдения стереоскопического изображения. Так возник новый формат кинонегатива 8/70 (фото 4), который получил название «Large Format» (Большой формат), а формат проекционного изображения с такого негатива стал называться «Giant Screen» (Гигантский экран). Родоначальником демонстрации киноизображения на сверхбольшие экраны была именно компания IWERKS, по пути которой пошла в дальнейшем компания IMAX.

Система IMAX, как технология проекции на сверхбольшие экраны, возникла из мультипроекционной системы, где увеличение площади изображения достигалось сочленением девяти изображений, демонстрируемых с синхронизированных 35-мм кинопроекторов. Впервые эта система демонстрировалась на всемирной выставке

с шагом в 5 перфораций (5/70). Показ шёл либо с двух синхронизированных 70-мм киноплёнок, либо с одного 70-мм позитива, на котором с двух негативов была отпечатана вертикальная стереопара с шагом в 10 перфораций. В отличие от системы «Стерео-70», эта система не имела коммерческого распространения в кинотеатральной сети у нас в стране. Но её аналог получил широкое распространение в сети парковых аттракционов, таких, как «Disneyland» или «Futuroscope».

Соотношение сторон пятиперфорационного кадра 2.2:1 резко выявляло преимущество ширины над высотой в восприятии пространственной композиции, что несвойственно нашему естественному зрению. Такое широкоформатное изображение не создавало иллюзии полного погружения в изображение, а только раздвигало горизонтальные углы наблюдения, выводя на периферию вертикальные границы кадра, оставляя в зоне наблюдения горизонтальные.

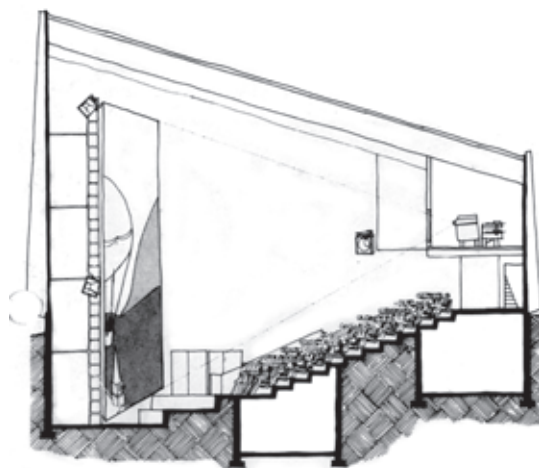


Фото 5. Схема зала IMAX

в Монреале в 1967 году. Технология была сложной и громоздкой для коммерческого внедрения, поэтому целью стало создание системы демонстрации изображения на гигантском экране с одной плёнки одним проектором.

Девять изображений с девяти 35-мм плёнок заменили единым кадром шириной в 15 перфораций, расположенным вдоль 70-мм киноплёнки. Тем самым удалось увеличить площадь кадра относительно стандартного 35-мм формата в 9 раз. Так родился новый формат 15/70, обозначенный аббревиатурой «IMAX» (фото 4).

По признанию одного из группы канадских изобретателей IMAX Грема Фергюсона (Graeme Ferguson), им двигала идея Сергея Эйзенштейна нового вида кинематографа, который он называл «вариоскопическое кино».

В своём видеообращении, посвящённом столетнему юбилею профессора В.Г. Комара, Грем Фергюсон говорит: «В традиционном кинематографе форма и размер экрана жёстко определяют формат и композицию кадра. Эйзенштейн хотел, чтобы всё было наоборот. Он мечтал, чтобы драматургия диктовала форму и размер экрана. Так, например, если бы он снимал крупный план лица, экран принимал бы форму, подходящую для этого. В случае вестерна экран был бы вытянутым по горизонтали. Если бы объект был бы очень высоким или низким, экран принял бы нужную для этого форму в соответствии с замыслом истории. Я подумал, что «вариоскопическое кино» – это хорошая идея, но я не мог понять, как её можно реализовать. А потом в Японии в городе Осака, наконец, увидел её практическое воплощение. В 1970 году на всемирной выставке «ЭКСПО-70» в советском павильоне был представлен вариоскопический кинотеатр, где я смог увидеть то, о чём говорил Эйзенштейн. В советском павильоне был ещё один интересный кинотеатр, где показывали стереокино без очков. Обе эти революционные технологии были разработаны в НИКФИ. Мои друзья и я в то время только изобрели другую технологию съёмки и демонстрации кинофильмов, которую мы назвали IMAX. Мы её презентовали на той же выставке в Осака. В то время у нас не было никакого опыта в 3D, а НИКФИ



Фото 6. Зал IMAX

был лидером в этой области и разработал очень продвинутые стереокамеры. НИКФИ, в лице профессора В. Г. Комара, совершил очень щедрый поступок, предоставив эти камеры для изучения в национальный совет по кинематографии Канады. И это позволило провести эксперименты с 3D, и в итоге привело к созданию IMAX 3D. Как показало время, эта инновация оказалась крайне полезным и очень популярным изобретением».

Вот таков советский след в становлении самой высококачественной системы отображения трёхмерного изображения в кинематографе. Сделав верный вывод, что пятиперфорационный кадр с соотношением сторон 2.2:1 на 70-мм плёнке не позволит иметь надлежащую высоту экрана в зале, они пришли к решению использовать формат IMAX (15/70) и в стереокино. Потребовалось удвоить как количество плёнок при съёмке, так и при проекции. Впервые система IMAX 3D была презентована на выставке EXPO-86 в Ванкувере (Канада) в 1986 году.

Увеличение размера кадра на плёнке позволило значительно увеличить размер экранного изображения без ущерба для его чёткости и яркости, расширить угол наблюдения изображения не только по ширине, но и по высоте кадра, достигнув соотношения сторон изображения 4:3. Из поля зрения ушли границы кадра, зритель стал видеть мир уже «не через окно», а как бы погружаясь в этот мир (фото 5). При съёмке фильмов в первую очередь учитывалась специфика восприятия изображения на гигантском экране. Требования к композиционному построению кадра были таковы, чтобы активная сюжетная часть концентрировалась в центре экрана, а краевые участки предназначались для периферийного зрения. «Giant Screen» (Гигантский Экран), в отличие от таких экранных форм демонстрации, как «Cinegama» и «CinemaScore», даёт возможность создавать зоны периферийного наблюдения не только по ширине, но и по высоте, так называемые, «залобные» зоны (фото 6).

Зародившаяся на базе плёночных технологий, компания IMAX в скором времени задействует цифровые



Стереокамера двухплёночная 70 мм формата, кадр 15 перф. вес с 120 метровой кассетой – 97 кг.

Фото 7. Стереокамера IMAX 3D

технологии и начнёт сдавать позиции высококачественной системы отображения. Причина тому – не столько технический аспект отставания фотографического качества цифрового изображения от плёночного, сколько психологический: несовпадение идеалов изобретателей формата IMAX с маркетинговыми целями менеджеров, пришедших управлять компанией IMAX в начале нового века. Важна не точность хронологии развития компании, а анализ причинно-следственных связей, приведших к изменению технологии в формате IMAX.

В эмоциональном восприятии объёмного изображения преимущества IMAX 3D перед каким-либо другим форматом неоспоримы, однако его реализация в киноплёночной технологии делала систему уязвимой как в экономическом аспекте (высокая затратность в съёмке и демонстрации), так и в творческом потенциале. Недостаток, присущий всем двухплёночным системам, в системе IMAX 3D увеличивается в геометрической прогрессии. Из-за значительных объёмов и веса съёмочной аппаратуры, достигающей 90 кг, порой невозможна динамичная киносъёмка (фото 7). Производство стереофильмов в формате IMAX 3D начинает тяготеть к компьютерной анимации, где проще было записывать стереоизображения виртуальными камерами. Всё чаще в стереофильмах данного формата живая съёмка вытесняется цифровым синтезом, но и это не оптимизирует экономику кинопоказа, потому что, сокращая использование дорогостоящего широкоформатного кинонегатива в киносъёмочном процессе, компания «IMAX» в стереокинотеатрах продолжала использовать дорогостоящие 70-мм фильмокопии. Так, например, лазерный вывод на два 70-мм кинонегатива пятиминутного экспериментального кукольного стереофильма «Чучело» (фото 8), снятого одним цифровым аппаратом по технологии, разработанной в НИКФИ, стоил 30000 \$, а печать 70-мм фильмокопии (на двух плёнках) – 2500 \$.

Кинотеатральная сеть формата «Giant Screen», насчитывающая к 2002 году 230 кинотеатров в 32 странах мира (данные из пресс-релиза компании IMAX),



Фото 8. Кадр из стереофильма «Чучело»

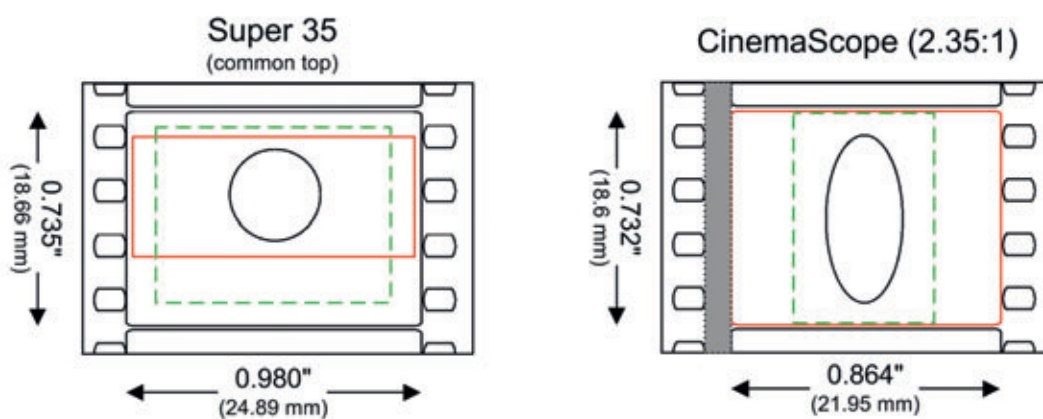


Фото 9. Формат кинокадра «Супер 35» и «СинемаСкоре»



Фото 9а. Перевод 35-мм негатива в формат IMAX

в основном, показывала видовые, научно-популярные и документальные фильмы продолжительностью 45 минут. Снимать фильмы большей продолжительностью было нерентабельно. Кинозалы IMAX располагались в научно-технических центрах или музеях естествознания, истории, космонавтики и т.п. Значение фильмов, снятых в плоскостном или трёхмерном формате IMAX для детской и подростковой аудитории, было велико

для процесса познания окружающего мира. Но игровых стереофильмов короткого метража практически не производилось. Пожалуй, первым и единственным игровым фильмом в формате IMAX 3D был сорокаминутный фильм «Крылья храбрости» («Wings of Courage») режиссёра Жан-Жак Анно (Jean-Jacques Annaud), совместное производство США и Франции, 1995 г. – о трагическом эпизоде гибели лётчика и писателя Сент-Экзюпери.



Фото 10. Сравнительные размеры экранов оригинального IMAX и IMAX MPX

Внедрение кинотеатральной сети IMAX в торгово-развлекательные центры требовало изменения репертуара и увеличения доли фильмов игровых жанров. В 2002 году компания анонсировала свою революционную технологию DMR (Digital Remastering), которая позволяла путём сканирования изображения с 35-мм четырёхперфорационного кинопозитива, после математической обработки, вывести его вновь на 70-мм кинопозитив в формате 15/70. Это позволило компании ввести в репертуар своих кинотеатров голливудскую продукцию. Первым образцом такой великолепной трансформации был фильм «Apollo 13» («Аполлон 13»). Выбор фильма был не случайным. Он снимался сферической, а не анаморфотной оптикой. Поэтому, несмотря на то, что в обычной кинотеатральной версии фильм демонстрировался в формате «CinemaScope» с соотношением сторон 2.39:1, широко распространённом в Голливуде, оригинальный негатив имел соотношение полноформатного кадра «Супер-35» с соотношением сторон 1.33:1, что было близко к формату IMAX – 15/70 с соотношением сторон 1.44:1 (фото 9). Это позволило при трансформации 35-мм изображения в 70-мм полностью заполнить высоту кадра. Общие планы космодрома, старта ракеты, её пролёт в космическом пространстве, интерьеры корабля получили ещё большее эмоциональное воздействие на зрителей (фото 9 а).

Но одновременно в первых экспериментах с «Apollo 13» обнаружилось, что композиционно-монтажное построение изображения, снятого для традиционного кинотеатрального показа, не соответствует специфическим требованиям показа на гигантском экране. Особенно это проявлялось в драматических сценах, когда игра актёров передавалась через средние и крупные планы, что не оставляло места участкам изображения для периферийного зрения как по ширине, так и по вертикали. В случае с «Apollo 13», зрителю всё-таки предоставлялась возможность наблюдать на гигантском экране во всю высоту участки изображения, которые были обрезаны в традиционных кинотеатрах с соотношением сторон экрана 2.39:1. Впоследствии при переводе в формат IMAX таких филь-



Фото 11. Неиспользованные площади кадра в фильмокопии

мов, как «Матрица», «Гарри Потер», «Человек-паук» и др., перестали использовать формат оригинального негатива «Супер-35», и зритель наблюдал на гигантском экране изображение в два раза меньше высоты самого экрана. Практически это был возврат к широкоформатному кинематографу 60–80-х годов. Именно роман компании IMAX с Голливудом послужил причиной отказа от многих идеалов создателей самой системы.

Количество фильмов, снимаемых на негативе 15/70 в оригинальном формате IMAX, резко сокращалось и не имело того коммерческого значения в доли проката, как голливудская продукция, трансформируемая технологией DMR в формат IMAX. В этой связи строительство кинотеатров с экранами гигантских размеров с соотношением 1.44:1 было признано нецелесообразным. Для проведения политики численного увеличения своего присутствия в мировой кинотеатральной сети компания решила создать облегчённый вариант системы IMAX.

В марте 2004 года компания анонсировала новую систему IMAX MPX с новыми параметрами кинопоказа. Если предыдущая система предполагала установку гигантского экрана в специально спроектированном зале, то новая система, позиционируемая как «не дорогостоящая, гарантирующая эффективность затрат», была спроектирована для мультиплексов, где размеры экрана были значительно меньше размеров оригинального IMAX (фото 10). Парадокс заключался в том, что, уменьшив высоту экрана до соотношения 1.78:1 (но практически показывая изображение с соотношением 2.39:1), продолжали использовать формат кадра 15/70, который имел соотношение 1.44:1. В результате оставались неиспользованными от 14% до 28% площади кадра в дорогой позитивной фильмокопии (фото 11).

От прежней системы IMAX, которая позиционировалась как система для гигантского экрана, в новой системе оставалось только традиционное качество звука и факт использования плёнки с кадром формата 15/70, что позволяло иметь высококачественное фотографическое изображение. Но и это преимущество перед всеми



Фото 12. Цифровые проекторы под логотипом IMAX

остальными системами скоро исчезнет с приходом цифровых технологий и замещением 70-мм фильмокопий на цифровые носители изображения.

Помню, какой шок испытали в 2008 году в городе Нью-Йорке участники очередной международной конференции ассоциации кинематографистов гигантского экрана – GSCA (Giant Screen Cinema Association), членом которой является НИКФИ. Компания IMAX тогда объявила, что отказывается от плёночной технологии в кинопроекции, считая её нерентабельной, и полностью переходит на цифровые технологии. Нас завели в один из залов мультиплекса, по планировке непривычного для залов IMAX. Длинный и узкий зал, с 30-ю рядами кресел, в то время как максимальное число всегда было не более 15. Но самое сокрушительное впечатление произвёл экран. Первое ощущение, что ему снесли половину высоты. Посыпались вопросы: чем же эта новая система отличается от формата «CinemaScore»?

Все вышеперечисленные трансформации технологий IMAX чувствительно отразились на восприятии стереофильмов, когда шаг за шагом нивелировались преимущества гигантского экрана. Особенно это проявилось с радикальным отказом от 70-мм фильмокопий. Не имея в арсенале цифровые проектора высокого разрешения, компания перешла с 70-мм плёнки, где кадр 15/70 имел разрешение 8 К, к цифровой проекции с максимальным разрешением 2 К. Цифровые проектора, на корпусе которых нанесён логотип IMAX Digital – это те же традиционные цифровые проектора компании «Christie» (фото 12). Что касается самого формата цифрового изображения, то и здесь мы имеем дело с традиционным DCP пакетом, слегка модернизированным компанией IMAX, но лишь с целью невозможности воспроизведения с сервера в обычных цифровых залах, и наоборот. Принципиально, в сегодняшних залах сети IMAX нам демонстрируют изображение тех же параметров, что и в обычных цифровых залах, но за другие деньги. Предпочтение, которое зрители оказывают залам IMAX, объясняется только одним – обычные цифровые залы, где показывают

стереофильмы, в большинстве своём непригодны для восприятия стереофильмов. В большинстве таких залов, как правило, низкий подъём пола, в результате чего приходится поднимать экраны вверх. Соответствуя формату 2.39:1, эти экраны, как правило, не широкие, а узкие по высоте, и зритель наблюдает трёхмерное изображение не столько через окно, сколько через щель, и нижняя граница кадра находится в зоне активного, а не периферийного зрения. Самая комфортная для восприятия центральная зона занята не креслами, а проходом, оставляя зрителям боковые точки наблюдения.

К переходу на цифровые технологии оказалось не готовым и производство стереофильмов. В первую очередь это коснулось съёмок живой природы. До недавнего времени практически все цифровые камеры имели матрицы с соотношением сторон 1.78:1 и с максимальным разрешением 2 К, что не соответствует требованиям формата. Когда один из первых стереофильмов режиссёра Джеймса Камерона «Путь к Титанику», снятый цифровыми камерами Sony Alta, демонстрировался в кинотеатрах IMAX, тогда ещё параллельно в репертуаре находились фильмы, снятые камерами IMAX 3D на 70-мм плёнку. И зритель мог видеть ощутимую разницу между цифровыми и плёночными системами. Сегодня такой возможности мы уже не имеем. С появлением цифровых камер разрешением 4 К, таких как RED EPIC или Phantom 65, вопрос увеличения качества изображения может быть решён положительно, но остаётся нерешённой проблема увеличения высоты кадра за счёт изменения соотношения сторон матриц с 16:9 к 4:3.

По последним сведениям, любезно предоставленными Олегом Березиным (компания «Нева-фильм») непосредственно из штаб-квартиры компании IMAX, на смену цифровым проекторам DLP в скором времени придут лазерные проекторы компании «Варсо» разрешением 4 К. Компания планирует вернуться к изображению с соотношением сторон 1.44:1. Вероятно, при таких новациях IMAX, ставший для сегодняшних зрителей уже легендой, вновь возродится в формате эксклюзивной высококачественной системы демонстрации стереоизображений. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Рожков С.Н., Овсянникова Н.А. Стереоскопия в кино-, фото-, видеотехнике. Терминологический словарь. М.: Парадиз, 2003.
2. Мелкумов А.С. Стереоскопический кинематограф. М: ВГИК, 2013.
3. Майоров Н.А. Панорамные системы кинематографа. МТК, № 21–22, 2011.
4. Майоров Н.А. Широкоэкранные системы кинематографа. МТК, № 25–26, 2012.
5. Мелкумов А.С. СТЕРЕО-70 и IMAX 3D – анализ технологий. Киномеханик, № 10, 2002.
6. Официальный сайт компании IMAX – <https://www.imax.com/>
7. Материалы международных конференций GSCA – <http://www.giantscreencinema.com/>