

№8 СОДЕРЖАНИЕ:



стр. 2

Новости, обзоры

Выставки, семинары	2
ОАО «НИКФИ» на CPS	4
Презентация научно-технического журнала «МИР ТЕХНИКИ КИНО»	5
А. С. Мелкумов Участие ОАО «НИКФИ» в международных презентациях	6

Доклады

М. С. Васин Использование средств цифрового электронного кинематографа в Госфильмофонде России	7
---	---



стр. 10

Технологии

О. Н. Раев Киносъёмка движущихся автомобилей	10
---	----

Стандарты

Д. Г. Чекалин Многоканальное звуковоспроизведение в кинотеатральном кинематографе и новые стандарты для цифрового кино	14
---	----



стр. 21

Голография

В. Г. Комар Трёхмерное изображение	20
---------------------------------------	----

Д. С. Лушников, С. Б. Одинокоев, А. Ю. Павлов Опτικο-электронная система «ГОЛОИНИД» для индивидуализации и идентификации защитных голограмм	21
--	----



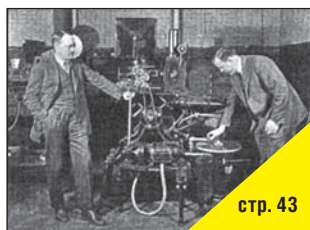
стр. 27

В. И. Сябер, И. Й. Погань, И. В. Твердохлеб, А. А. Ивановский Модернизация схемы записи радужных голограмм для получения кинетических эффектов на глубине. Голографический элемент БИГРАММА	25
--	----

А. Г. Полещук Дифракционная оптика	27
---------------------------------------	----

Н. М. Ганжерли, А. С. Гурин, Д. Д. Крамущенко, И. А. Маурер, Д. Ф. Черных, С. Н. Гуляев Параметры голографических диффузоров в зависимости от формы апертуры и типа регистрирующей среды	32
---	----

Е. Ф. Пен, И. Г. Шаталов Исследование объёмов микрочастиц и рельефных объектов методами цифровой голографии	35
--	----



стр. 43

Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов Подавление зависимости дифракционной эффективности отражательных двухслойных рельефно-фазовых дифракционных структур от длины волны	41
--	----

Н. Г. Власов, С. М. Кулиш Нелинейная цифровая обработка дифракционных картин	42
---	----

Мастер-класс, семинары, новости SMPTE, отзывы

Л. Липтон Новая революционная технология: стереоскопическое кино	43
---	----

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 финансовой поддержке Федерального агентства по культуре и кинематографии

Редационный совет:
Комар Виктор Григорьевич, проф., д.т.н.
Сакварелидзе Майя Александровна, д.х.н.
Тимофеев Александр Евгеньевич, к.т.н.
Блохин Александр Сергеевич, к.т.н.
Ковалевская Нонна Сергеевна, к.т.н.
Лишин Лаврентий Григорьевич, к.т.н.
Волков Александр Сергеевич

Руководитель проекта:
Костылев Олег Юрьевич

Главный редактор:
Егоров Владимир Викторович
Выпускающий редактор:
Захарова Тамара Владимировна

Арт-директор, оформление обложки:
Шишкин Владимир Геннадьевич
Верстка и дизайн:
Титова Наталия Сергеевна
Корректор:
Сайкина Наталья Владимировна

Отпечатано в ООО «Типография ПАРАДИЗ»
Объем 6 п.л. Заказ №
Тираж 1300 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 не всегда совпадает со взглядами авторов статей.

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



Выставки, конференции

■ С 18 по 21 марта 2008 года в Центре международной торговли проходила 5-я юбилейная международная специализированная выставка услуг в области кино- и телепроизводства Cinema Production Service. CPS является единственной в России выставкой, ориентированной на продюсеров и других специалистов отечественной киноиндустрии, принимающих непосредственное участие в процессе создания фильмов.

За прошедшие пять лет существования выставка **CPS/Cinema Production Service** зарекомендовала себя на российском рынке кинопроизводства как лучшая площадка общения между продюсерами, техническим персоналом и творческими кадрами. Около 100 компаний, предоставляющих услуги в области кинопроизводства, из Великобритании, Германии, Белоруссии, Латвии, России, Словакии, США, Узбекистана, Украины, Финляндии, Чехии и Японии были представлены на двух этажах Центра международной торговли.

Открыл Форум Президент Гильдии продюсеров Александр Голутва. В своём выступлении он рассказал собравшимся о ключевых особенностях государственной политики в области развития инфраструктуры производства кино в Российской Федерации, о необходимости увеличения производственных мощностей киностудий и оснащении их новейшими технологиями. Необходимо также

удержать цены на их услуги в пределах, соответствующих реальным возможностям заказчиков, то есть продюсеров российского кино, и обеспечить преемственность поколений в области подготовки квалифицированных кадров. Докладчик также признал, что процесс акционирования многих киностудий проходил «долго, неповоротливо и не всегда правильно», что снизило заинтересованность бизнеса в развитии отечественных кинофабрик. Полностью в ведении государства остаются: ФГУП «Киноконцерн «Мосфильм» (его стратегический статус подтверждён Правительством РФ), ОАО «Ленфильм», ОАО «ТПО Центральная киностудия детских и юношеских фильмов имени М. Горького», ОАО «Центр национального фильма» и ОАО «Свердловская киностудия».

Особенностью выставки стала насыщенная параллельная программа: семинары, конференции, мастер-классы, на которых можно было узнать о новых технологиях в кинематографе и ознакомиться с новым оборудованием.

■ Научно-исследовательский кинофотоинститут ОАО «НИКФИ» на выставке представил ряд новых разработок, из которых наибольший интерес у посетителей вызвали два экспоната: установка для съёмки стереоскопических кукольных анимационных фильмов и установка для цифровой съёмки стереофильмов.



О стенде ОАО «НИКФИ» читайте на стр. 4.

В рамках выставки прошла **презентация журнала «Мир Техники Кино»**, на которой обсуждались тематика журнала, цели и задачи публикаций, направленные на стимулирование научно-технических разработок в киноотрасли. В конце обсуждения было объявлено о начале конкурса на лучшую научную статью в журнале МТК. О презентации журнала читайте на стр. 5.

- Прошла презентация новой 35-мм сверхлёгкой компактной камеры для специальных видов съёмки, разработанной Московским конструкторским бюро киноаппаратуры (МКБК) совместно с АСТ Сергея Астахова.

- Презентация Ялтинской киностудии – «Сервис Ялтинской киностудии в Крыму: широкий формат, телевидение, клипы и реклама» (новые возможности киностудии, возродившей собственное кинопроизводство).

Прошли семинары:

- «Актуальные технологии кино» – о возможностях использования нового оборудования от крупнейших зарубежных производителей Panther GmbH, ARRI, Fujinon, P+S Technik.

- «Использование цифровой кинокамеры SI-2K» (компания P+S Technik GmbH, Германия).

- «Прецизионные производственные решения» (компания Dedotec Russia и Dedo Weigert Film).

- «Новое в законодательстве по авторскому праву» (Юридическое Кинематографическое Агентство).

- «Цифровые технологии в кинематографе» (SONY).

- «Кодак и современные технологии кинопроизводства» (Kodak).

- «Супермагистраль для передачи киноконтента» (Proline, CISCO System).

Был проведён мастер-класс «Цифровое кинопроизводство. Новые возможности. Преимущества технологии Panasonic и Apple».

19 марта на выставке состоялась церемония вручения ежегодной премии CPS Award «За достижения в области кинопроизводства».

За время работы выставку **CPS-2008** посетило **2725 человек**.

26 апреля в городе Набережные Челны (Татарстан) прошла конференция «Развитие региональной сети цифровых кинотеатров Российской Федерации». В рамках конференции состоялось и выездное заседание Комитета Государственной Думы по культуре и кинематографии, где обсуждались проекты по разработке технологического переоснащения производственной базы государственных учреждений кинопроката и сети муниципальных театров с целью повышения качества кинопоказа на территории Российской Федерации.

В период с **19 по 22 мая 2008 года** в Сеуле (Корея) состоялось 20-е пленарное заседание Международной Организации по стандартизации ИСО ТК 36. От России участие в заседании приняли заместитель генерального директора ОАО «НИКФИ» Н. Ковалевская, заведующий лабораторией ОАО «НИКФИ» В. Сычѳв и проректор Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения А. Перегудов.

28 мая во ВГИКе прошла конференция «Новые технологии и технические средства в фильмопроизводстве». Внедрение цифровых технологий в кинематограф ставит новые проблемы и заставляет самих преподавателей учиться, повышая квалификацию, и учить студентов. Ректор В. Малышев организовал эту конференцию, пригласив принять участие в обсуждении технических специалистов Госфильмофонда, ОАО «НИКФИ», МКБК, ФГУП «Киноконцерн «Мосфильм», «Кодак», «Саламандра», телевидения, отраслевых ВУЗов – СПбГУКиТ и МКВИ. Выступления участников конференции читайте в следующих номерах МТК. ■





Стенд ОАО «НИКФИ» на выставке СРС



■ На стенде были представлены разработки ОАО «НИКФИ» за последние несколько лет:

Установка для съёмки анимационных кукольных стереофильмов предусматривает фиксацию каждой фазы движения последовательно с двух ракурсов одним серийным цифровым фотоаппаратом, например, «Canon EOS 350D» или «Canon EOS 5D», и записи снятого материала на серийный компьютер.

На стенде фильм демонстрировался в безочковом варианте (двухракурсный материал этого фильма, пе-

ресчитанный в девятиракурсный, отображался на специальном мониторе фирмы «Филипс»).

Установка для цифровой съёмки стереофильмов предназначена для стереокиносъёмки в условиях природы и интерьера.

Кинотеатральный конденсаторный микрофон разработан для записи фонограмм при производстве кинофильмов на кино-, теле- и видеостудиях, при организации трансляции спектаклей в технических помещениях театра, гримёрных и т.п., при создании фондовых записей, записи фонограмм спектаклей.

Ламповый конденсаторный микрофон предназначен для создания фондовых записей, записи фонограмм спектаклей и записи фонограмм при производстве кинофильмов на кино-, теле- и видеостудиях, а также студиях звукозаписи.

Конструкция, используемые элементы и материалы обеспечивают надёжную работу микрофона как в условиях закрытых помещений, так и на открытых пространствах.

Были представлены **осветительные приборы с несимметричным светораспределением «Кососвет-1000» и «Кососвет-2000», переносные электрораспределительные устройства «Атлант 3.1-48», «Атлант 3.1-75», «Атлант 3.1-96»,** предназначенные для электрокоммутации и электрозащиты установок киносъёмочного освещения на природе, в павильонах и в естественных интерьерах при киносъёмках и телепередачах. ■





УЧАСТИЕ ОАО «НИКФИ» В МЕЖДУНАРОДНЫХ ПРЕЗЕНТАЦИЯХ

А. С. МЕЛКУМОВ, зав. сектором цифрового стереокино, ОАО «НИКФИ»

■ Последние три года в Научно-исследовательском кинофотоинституте активно разрабатывалась стратегия выхода на рынок кинематографии «Гигантского Экрана». Идея использования лёгких и компактных стереокамер отечественной системы «Сtereo-70» в качестве альтернативы тяжёлым стереокамерам корпорации IMAX была поддержана компаниями «Big Film» (Канада) и DKP 70mm Inc. (США).

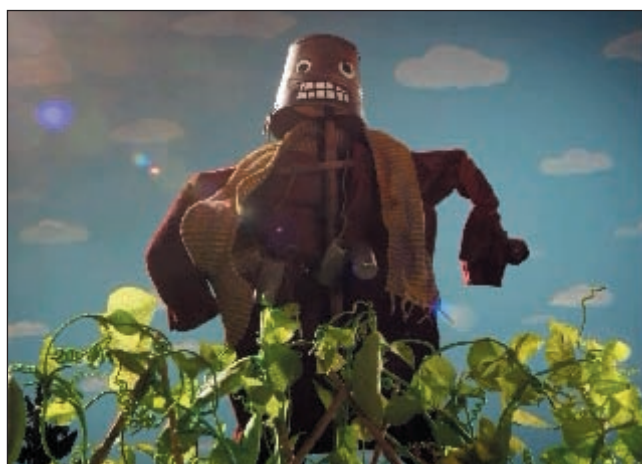
В поисках новых направлений реализации дальнейшего производства отечественных стереофильмов для гигантского экрана были проведены исследования и разработка технологии стереосъёмки кукольных анимационных фильмов в цифровом формате с последующей лазерной записью на кинонегатив в формате 2x1570 (горизонтальный кадр в 15 перфораций на 70-мм киноплёнке). Съёмки проводились на базе Таллиннской студии кукольных фильмов «NUKUFILM», с которой НИКФИ сотрудничает более 25 лет в производстве кукольных стереофильмов по системе «Сtereo-70».

С 2006 года ОАО «НИКФИ» является членом ассоциации производителей фильмов для гигантских экранов – Giant Screen Cinema Association (GSCA) и принимает самое активное участие в проводимых GSCA конференциях.

В первых числах марта 2008 года в Лондоне проходила конференция London Film Expo, организатором которой выступила ассоциация GSCA. На этой конференции были заявлены презентации в двух номинациях – «Новый фильм» и «Фильм в производстве».

Успех показа кукольного экспериментального стереофильма «Чучело» на предыдущей конференции в Ванкувере (Канада) в сентябре 2007 года был огромным, впоследствии он был закреплён показом фильма в Лондоне. Кукольный стереофильм «Чучело» создан эстонскими аниматорами студии «NUKU FILM» (продюсеры Александр Тимофеев и Арво Нуут) по разработанной А. Мелкумовым и С. Рожковым (ОАО «НИКФИ») бесплёночной технологии.

Постоянство в развитии бесплёночной технологии стереосъёмки и её коммерциализации было продемонстрировано в презентации трейлера кукольного полномет-



Кадр из стереофильма «Чучело»

ражного стереофильма «Синяя Борода», производство которого ведёт студия «УМР» (продюсеры Рауф Атамалибеков и Сергей Карпов). Это уже следующий этап в разработке технологии производства анимационных стереофильмов, где кукольная стереосъёмка соединена с трёхмерной компьютерной графикой.

Активное участие ОАО «НИКФИ» в международных конференциях не прошло незамеченным. И уже английский аниматор Barry Purves решил снимать по нашей, российской технологии, кукольный стереофильм «Петрушка» на музыку И.Ф. Стравинского, где кукольную анимацию планируется соединить с реальными актёрами.

Участие в международных презентациях – очень важный фактор для рекламы отечественных разработок и их мирового признания. Так, например, в этом, 2008 году, ожидается появление на мировых экранах стереофильма «Coralline». Этот фильм анонсировался как первый кукольный стереофильм в мировой практике.

Сентябрьская презентация 2007 года в Ванкувере стереофильма «Чучело» послужила весомым аргументом в утверждении, что первый кукольный бесплёночный стереофильм создан не в Голливуде, а в России, специалистами ОАО «НИКФИ» совместно с Таллиннской киностудией кукольных фильмов «NUKUFILM» (Эстония). ■



Презентация научно-технического журнала «Мир техники кино»

■ В рамках 5-й международной выставки услуг для кино и телепроизводства прошла презентация научно-технического журнала «Мир техники кино». Презентацию открыли главный редактор Егоров В. В. и руководитель проекта Костылев О. Ю., которые отметили, что за время своего существования (два года) журнал нашёл своего читателя, что его деятельность формируется в правильном направлении как единственный научно-технический журнал в области науки, техники и технологии кинематографа. В будущем журнал будет регулярно информировать своего читателя о результатах текущих работ в нашей стране и за рубежом по совершенствованию и освоению новых технологий в кинематографии, и уделять особое внимание перспективным научным направлениям.

В выступлениях д.т.н. Комара В. Г. (ОАО «НИКФИ»), д.т.н. Барского А. Б. (МИИТ), д.х.н. Саквалиридзе М. А. (МКВИ), к.т.н. Индлина Ю. А. (ОАО «НИКФИ»), Чекалина Д. Г. (ОАО «НИКФИ») подчеркивалась важность и необходимость такого журнала.

Заместитель директора ОАО «НИКФИ» к.т.н. Ковалевская Н. С. поделилась планами взаимодействия ОАО «НИКФИ» и творческого коллектива журнала в обсуждении вопросов стандартизации. Дискуссия, открытая на страницах журнала по этим вопросам призвана, в частности, уберечь от серьёзных ошибок при разработке национальных стандартов цифрового кинематографа.

На страницах журнала большое внимание уделяется вопросам по разработке систем кинематографа с трёх-



мерным изображением: стереоскопического (стереокино) и голографического. Д.т.н. Комар В. Г. (ОАО «НИКФИ») рассказал, что на сегодня ведутся интересные работы по созданию безочковой растровой системы со стереоскопическим многокурсным изображением (руководитель д.т.н. Овечкис Ю. Н., ОАО «НИКФИ»). Он так же отметил, что кардинальное решение проблемы кинематографии с трёхмерным изображением лежит в голографии. Голографическое изображение имеет ряд решающих преимуществ перед стереоскопическим и обеспечивает широкое использование в

кинематографии совершенно новых изобразительных возможностей – создание удивительно реалистичных и выразительных эффектных сцен. В настоящее время после достижений в области оптики, электроники и точной механики реально на базе ранее разработанных принципов быстро изготовить все необходимые технические средства, снять коммерческий голографический кинофильм и открыть голографический кинотеатр. Здесь возникают возможности для интересной изобретательской деятельности, где талантливая молодёжь сможет реализовать свои творческие возможности. Следует отметить такую важную функцию журнала, как обязательная публикация основного содержания диссертаций перед защитой и сейчас журнал проходит оформление в ВАК на получение статуса научно-технического издания.

Редколлегия журнала старается привлечь молодёжь из разных ВУЗов и колледжей страны как кинематографических, так и смежных областей.

Выпускающий редактор Захарова Т. В. объявила об учреждении редакцией журнала при поддержке Федерального агентства по культуре и кинематографии конкурса на лучшую научную публикацию в журнале за 2008 г среди молодых специалистов и учёных ведущих ВУЗОВ страны. Об условиях конкурса рассказала д.х.н. Саквалиридзе М. А. (МКВИ).

Это первая презентация журнала и её форма проведения на выставке оказалась удачной, так как позволила многим участникам и посетителям выставки познакомиться с редакцией и авторами статей журнала. ■





ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ЦИФРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО КИНЕМАТОГРАФА В ГОСФИЛЬМОФОНДЕ РОССИИ

М. С. ВАСИН, зам. главного инженера
Госфильмофонда России

В кинопромышленности в последние годы наметилась устойчивая тенденция применения новых средств и технологий. Отрадно, что технический прогресс, наконец, коснулся, так называемых экранных процессов. Под экранными процессами понимают создание, тиражирование и демонстрацию кино-, теле-, видеозаписей и фонограмм, а также компьютерных подвижных и неподвижных изображений и звуковых сигналов.

■ О ПРЕИМУЩЕСТВЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Для хранения информации и последующего обмена ею всё чаще используются современные цифровые технологии записи и воспроизведения сигналограмм, так как они позволяют:

- получать электронные копии с исходных архивных материалов в различных цифровых форматах и создавать автоматизированные электронные архивы с исходным качеством;
- изготавливать резервный комплект исходных материалов с последующим возвратом к оригинальному носителю;
- получать фильмокопии с оригиналов для массового проката;
- обеспечить резервное длительное хранение кино материалов (в дополнение к существующей системе хранения изображения и звука на исходных носителях) в форме машиночитаемых копий (электронных копий) с обязательной возможностью обратного перевода исходного изображения и звука на киноплёнку без потери технического качества;
- восстановить звуковую и видеoinформацию с материалов низкого технического качества носителя (и находящихся на грани уничтожения);
- восстановить материалы фильмов, снятых по оригинальным технологиям, ныне утраченным.

Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что цифровые электронные технологии являются перспективной формой для длительного хранения киноматериалов, поскольку они обеспечивают:

- возможность длительного хранения киноматериалов в виде электронных копий за счёт использования современных носителей информации и своевременного переписывания в цифровой форме без потери качества;
- возможность выполнения реставрационных и восстановительных работ, которые нельзя осуществ-

вить с помощью фотографических (традиционно кинематографических) плёночных технологий и записать результаты на первичный носитель (киноплёнку);

- новые формы работы с заказчиками, в частности: упрощение и ускорение выбора материала (в сочетании со сбережением исходных фильмовых материалов), использование линий электронной связи для предоставления материала заказчику для предварительного просмотра;
- возможность облегчить работу архивиста по пополнению коллекции и обмену информацией.

О ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕВОДА НА ЦИФРОВЫЕ НОСИТЕЛИ

Проблема сохранения оригинальных материалов для кинофондов является особенно актуальной, поскольку в большинстве хранилищ имеются материалы фильмов, по тем или иным причинам, находящиеся на грани их дальнейшего применения (с большой усадкой, подверженные «укусному синдрому», с плохим техническим состоянием носителя и т. д.). Применение традиционных средств и методов хранения фильмовых материалов в большинстве случаев исчерпало свои возможности, и перед архивом встаёт дилемма – безвозвратно потерять погибающий материал или прибегнуть к новым технологиям. Для Госфильмофонда России ответ был очевиден. И в 1998-99 гг., когда потребовалось срочно принимать дополнительные меры по сохранению фонда фильмов и оригиналов фонограмм кинофильмов, специалистами фонда были начаты восстановительные работы.

В соответствии с тенденциями развития мирового кинематографа в Госфильмофонде России была разработана собственная программа использования электронных технологий для увеличения сроков хранения и предоставления широкого доступа общественности к кинофильмам, находящимся на хранении.

В первую очередь сотрудниками фонда были проведены работы по выявлению киноплёнок с признаками «уксусного» синдрома. Было установлено, что магнитная лента так же, как и киноплёнка, подвержена этому фактору разрушения, причём этот процесс протекает в них даже быстрее, чем в плёнках с фотографической эмульсией. Однако, к сожалению, при изучении не было выявлено единой тенденции проявления данного фактора разрушения, т. к. в различных рулонах плёнки процесс протекал по-разному. Исходя из этого, по заданию Госфильмофонда России НИКФИ разработал Руководящий технический материал «Процесс перевода исходных магнитных аналоговых фонограмм кинофильмов, записанных на 35-мм перфорированных магнитных лентах, на цифровые носители записи. Технологический регламент» (Р-19-256-2000) и Р-19-87-2003 «Кинематография. Исходные материалы фильмов. Условия хранения в фильмоархивах».

В качестве цифрового носителя Госфильмофондом России был выбран магнитооптический диск ёмкостью 1,3; 2,6 и 5,2 ГБ, и на основе этой технологии создан полный технологический комплекс.

Для специалистов фильмофонда имеет большое значение, что разработанная технология позволяет вернуться на исходный носитель (35-мм магнитную ленту) и без проведения каких-либо дополнительных операций обеспечить работу с данной фонограммой по традиционной плёночной технологии или перейти на какой-либо другой современный носитель. При этом обеспечивается печать негатива фонограммы уже непосредственно с носителя (фонограмма остаётся синхронной негативу изображения).

Применяемая технология перевода на цифровые носители предусматривает проведение следующих предварительных работ:

- проведение комплексного контроля магнитных фонограмм кинофильмов с целью выявления материалов, требующих срочного перевода на новый носитель;
- выполнение полного комплекса работ по реставрации исходного носителя (магнитной киноленты) ручным и/или машинным способом для увеличения сроков хранения магнитной фонограммы;
- проведение операции синхронизации всех компонентов фонограммы между собой и с изображением (что особенно актуально при переводе в цифровую форму на другой носитель).

Для проведения этих подготовительных работ в Госфильмофонде был запущен комплекс оборудования, позволяющий выполнять контроль записанной цифровой фонограммы, оригинала магнитной фонограммы, негатива (или позитива) фонограммы и оригинального изображения. В процессе контроля оцениваются (аппаратно) технические параметры записанной цифровой фонограммы, которые в режиме on-line можно сравнить с параметрами оригинала фонограммы, оценить син-

хронность всех компонентов фонограммы с исходным изображением.

При проведённом сотрудниками фонда анализе и контроле фонограмм, переписанных с оригиналов 6-7 лет назад, было отмечено, что качество звучания большей части самих оригиналов магнитных фонограмм значительно ухудшилось, что подтвердило своевременность проведённых работ по их копированию. Фонограммы, перенесённые на цифру, к настоящему моменту не изменили своих технических характеристик ни по одному из параметров. При копировании оригинальных фонограмм кинофильмов в Госфильмофонде России исходят из принципа – выполнять копирование в точном соответствии с параметрами фонограммы (1:1). Исключение составляет (при необходимости) изменение уровня записи.

СОХРАНЕНИЕ БЕЗ ПОТЕРИ ИНФОРМАЦИОННОГО КАЧЕСТВА

После начала работ и запуска в производство 2-х комплексов оборудования по переводу магнитных фонограмм на цифровой носитель с конца 90-х годов XX века и до настоящего времени в фонде обработано более 25 тыс. рулонов магнитной ленты. Важным является и то обстоятельство, что при проведении данных работ руководством Госфильмофонда России удалось сохранить кадровых сотрудников и подготовить новых, обучив их работе на современном оборудовании.

Таким образом, фонду удалось подойти к проблеме сохранения архива, используя средства электронного кинематографа, выполнив операцию прямого технического копирования (без использования средств компьютерной реставрации): киноплёнка – электронная копия – киноплёнка. Современные технические средства позволяют выполнять данное копирование практически без потерь информации оригинального носителя, особенно в случаях фильмовых материалов прошлых лет.

В данном случае, исходным материалом может являться негатив, позитив или любой промежуточный киноматериал, имеющийся в архиве. Потери качества при преобразовании «киноплёнка – цифровая копия – киноплёнка» минимальны.

В кинофондах основным оригинальным носителем киноизображения является фотографическая киноплёнка на горючей нитрооснове и/или безопасной триацетатной основе. В процессе длительного хранения киноматериалов возникают определённые трудности, связанные с изменением самого носителя (разложение основы – «уксусный синдром», усадка, старение, выцветание красителей и т. п.), воздействием на него окружающей среды (плесень, клещи, грибок и т. п.) и повреждением носителя в процессе эксплуатации (царапины, потёртости, порывы и др.). Следует подчеркнуть, что к процессу копирования, в первую очередь, подготавливаются магнитные ленты с признаками «уксусного синдрома».

После изъятия из фильмохранилища и проведения акклиматизации фильмового материала, необходимо

выполнение всестороннего контроля технического состояния исходного носителя с целью определения комплекса мероприятий по реставрации. На данном этапе необходимо чётко определить – какие виды машинной и/или ручной реставрации будут выполняться и на каком оборудовании, т. к. каждая киноплёнка имеет свои присущие только ей дефекты. Обычно одна из первых операций, которую необходимо выполнить – это увлажнение роликов с плёнкой до необходимых параметров.

В процессе **ручной** реставрации осуществляются мероприятия по восстановлению **физических** параметров носителя (ремонт перфораций, склеек, просечек, удаление локальных загрязнений и т. п.) и подготовка к **машинной** реставрации, во время проведения которой осуществляется увлажнение, удаление пыли, грязи, масляных загрязнений, плесени, грибка и др. Эти работы можно выполнить с помощью различных машин: ультразвуковых, чистящих, глянцевочных, полировочных, моющих и т. п. Естественно, что неисправимые дефекты, такие, как продольная и поперечная усадки основы киноплёнки, а вследствие этого и изменение геометрических размеров кинокадра, воздействия «уксусного синдрома» и т. п., устранить проведением данных реставрационных мероприятий не удаётся, и поэтому процесс сканирования необходимо проводить особо тщательно.

Перевод киноизображения на электронный носитель требуется выполнять с качеством исходного материала 2K и выше. На данном этапе окончательно формируются качественные показатели, заложенные в исходный киноматериал, т. к. чем выше характеристики сканера и мастерство операторов, тем с большей достоверностью электронная копия будет соответствовать оригиналу. Отсканированный материал сохраняется в цифровой форме на ленточном или дисковом носителе без компрессии.

Следующим этапом является проведение реставрационно-восстановительных мероприятий полученной цифровой копии. Необходимо выполнить восстановление исходных параметров, заложенных в кинопроизведении, т. е. устранить дефекты, привнесённые в материал вследствие его длительного хранения и использования, включая замену «испорченных» кадров. Возможно выполнение даже общей цветокоррекции (здесь главное – не сделать картинку лучше оригинала). Естественно, выполнение данной работы требуется лишь потому, что не удаётся устранить все дефекты хранения и использования материалов традиционными средствами. Результат этой работы – подготовка изображения к переводу на исходный носитель с максимальной достоверностью.

Одновременно формируется цифровой фонд на базе магнитных плёночных носителей из-за их относительной дешевизны на единицу хранения информации, большой ёмкости носителя и более высокой надёжности хранения, чем дисковые массивы. Такой фонд может иметь систему автоматизированного контроля с автоматической перезаписью материала в случае обнаружения про-

блем с его сохранностью. Используемый формат данных должен предусматривать хранение не только самого, не компрессированного изображения и звука, но и различной сервисной информации.

В процессе создания цифрового фонда параллельно создаются и копии кинофильмов с низким разрешением в цифровой или аналоговой форме записи. Эти копии размещаются в базе данных центрального компьютера и служат для удовлетворения спроса локальных пользователей, как в просмотрных залах архива, так и удалённых пользователей. При этом качество получаемого в случае удалённого доступа материала ограничивается лишь пропускной способностью используемого канала.

О ПРАВОМЕРНОСТИ КОПИРОВАНИЯ

На первый взгляд, позитив, изготовленный путём прямого копирования цветного или чёрно-белого негатива любого из фильмов 30-40-х годов XX века, должен полностью отражать эпоху того времени, когда негатив был создан. Однако, это не совсем так. И хотя практически не происходит вмешательства в стандартный кинотехнологический процесс, всё же технические характеристики современной позитивной киноплёнки существенно отличаются от киноплёнок прошлых лет. Да и воспроизводиться позитив будет на современном кинопроекторе, с установленной в нём ксеноновой лампой, световые характеристики которой значительно отличаются от источника света 30-40-х годов, и т. д. Поэтому полной идентичности восприятия при воспроизведении такого позитива добиться не удастся.

Если же негатив сначала отсканировать с качеством 2K или 4K, изготовив цифровую копию, и затем с неё записать позитив (а можно и негатив, и контратип), то в этом случае в позитив, изготовленный с использованием цифровых технологий при прямом копировании, также будут внесены искажения. Но эти искажения будут практически несравнимы с потерями при прямом копировании.

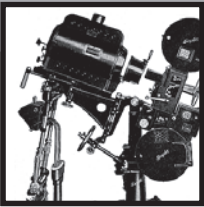
ВЫВОДЫ

Цифровые электронные технологии являются перспективной формой для долговременного хранения киноматериалов.

При использовании цифровых технологий записи и воспроизведения кинофильмов становится возможным:

- внести коррекцию отличия параметров как плёнок, так и кинопроектора или другого современного оборудования;
- изготовить страховую копию негатива;
- изготовить неограниченное количество копий для проката без повреждения исходного негатива.

Для сохранения аудиовизуальных произведений прошлых лет целесообразно использовать цифровые технологии в качестве промежуточной стадии – получение копии с оригинала в тех случаях, когда традиционными технологиями этого сделать не удаётся (киноплёнка – цифровой носитель – киноплёнка). ■



КИНОСЪЁМКА ДВИЖУЩИХСЯ АВТОМОБИЛЕЙ

О. Н. Раев, к.т.н., МКБК

■ При киносъёмке почти всех современных кино- и видеофильмов в кинокадре часто находятся движущиеся автомобили. При просмотре такого кинофильма в кинотеатре или по телевизору зритель иногда замечает, что колеса движущегося автомобиля неожиданно начинают вращаться медленнее, чем должно быть на самом деле, останавливаются или даже вращаются в противоположном направлении. Рассмотрим, почему это происходит.

Колесо автомобиля содержит ряд симметрично расположенных одинаковых элементов: лучи и отверстия диска, болты, рисунок протектора шины и т. д. (рис. 1). Поскольку мелкие элементы либо неразличимы глазом при просмотре кинофильма, либо теряются в результате «смаза» изображения вращающегося колеса, то зритель воспринимает вращение колеса через круговое движение лучей или крупных отверстий диска колеса. Обычно их количество на колесе от 3 до 18. Для грузовых автомобилей основным элементом, характеризующим вращение колеса, чаще всего является круговое движение контрастного рисунка протектора шины. Элементы дорожного рисунка протектора образуют продольные и поперечные рёбра и канавки. Нас интересует, в первую очередь, рисунок протектора на боковой стороне шины, поскольку он чётко виден и гораздо крупнее, чем на колёсах легковых автомобилей. На фотографии, приведённой на рис. 2, боковой рисунок протектора состоит из 24 элементов.

Предположим, что колесо снимаемого автомобиля содержит k наиболее крупных повторяющихся структур, например лучей диска, а скорость вращения колеса составляет n_k оборотов в секунду. Тогда освещённость участка киноплёнки или участка светочувствительной матрицы, через который проходит изображение лучей диска колеса, будет изменяться с частотой $\nu_s = kn_k$.

В результате дискретизации входного изображения по времени на носителе информации регистрируется последовательность кадров, смещённых во времени друг относительно друга на период смены кадров $T_c = 1/\nu_c$, где ν_c — частота киносъёмки.

Процесс дискретизации изображения по времени описывается формулой [1–3]:

$$E_{\text{вх}}^*(t) = E'_{\text{вх}}(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_c) T_c, \quad (1, 2)$$

где $E'_{\text{вх}}(t)$ — изображение в плоскости светочувствительного элемента (киноплёнка или матрица) киносъёмочного аппарата, созданное киносъёмочным объективом; $E_{\text{вх}}^*(t)$ — изображение, полученное в результате дискретизации;

$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_c) T_c$ — дискретизирующая функция;

$\delta(t - nT_c)$ — дельта-функция.

В спектральном пространстве, в результате дискретизации изображения, возникает бесконечное количество смещённых спектров изображения, отстоящих друг от друга на интервалах ν_c . Согласно теореме В. А. Котельникова, без искажений передаются только частоты $\nu_s < \nu_c/2$. Во всех остальных случаях появляются ложные частоты вращения за счёт наложения смещённых спектров изо-



Рис. 1. Колесо легкового автомобиля



Рис. 2. Колесо грузового автомобиля

бражения. Величину ложных частот можно определить следующим образом [4]:

$$v_{\text{э}}^* = v_{\text{э}} - v_{\text{с}} \operatorname{int} \left(\frac{v_{\text{э}} + 1}{v_{\text{с}}} \right), \quad (3)$$

где int — функция выделения целого числа из аргумента

$$\left(\frac{v_{\text{э}} + 1}{v_{\text{с}}} \right).$$

Формула 3) справедлива, если аргумент $\left(\frac{v_{\text{э}} + 1}{v_{\text{с}}} \right)$ не является целым числом, в противном случае

$$v_{\text{э}}^* = \pm \left[v_{\text{э}} - v_{\text{с}} \operatorname{int} \left(\frac{v_{\text{э}} + 1}{v_{\text{с}}} \right) \right]. \quad (4)$$

Рассмотрим неподвижный автомобиль, постепенно начинающий набирать скорость. Как следует из формул 3) и 4), при частотах $v_{\text{э}} < v_{\text{с}}/2$ лучи диска колеса в киноизображении увеличивают скорость поворота и движутся в направлении, соответствующем направлению вращения колеса автомобиля (частота $v_{\text{э}}$ положительная).

Когда $v_{\text{э}}$ становится равной $v_{\text{с}}/2$, лучи диска в киноизображении колеса как бы одновременно вращаются с двумя частотами $v_{\text{с}}/2$ и $-v_{\text{с}}/2$. Зритель воспринимает такое изображение как неподвижное. Чаще всего — как неустойчивое (изображение колеса вращается то в одну, то в другую сторону в результате разницы в размерах лучей и их расположения друг относительно друга, малейших изменений скорости движения автомобиля). Число лучей диска у колеса зритель видит удвоенным.

При увеличении скорости движения автомобиля в диапазоне частот $v_{\text{с}}/2 < v_{\text{э}} < v_{\text{с}}$ колесо в киноизображении вращается в противоположном направлении относительно реального колеса автомобиля, а величина скорости движения лучей диска колеса в киноизображении будет уменьшаться. И наконец, при частоте $v_{\text{э}} = v_{\text{с}}$ колесо в киноизображении станет неподвижным ($v_{\text{э}}^* = 0$), несмотря на продолжающееся движение автомобиля.

Дальнейшее увеличение скорости движения автомобиля приведёт к повторениям рассмотренного цикла изменения частот движения лучей диска колеса, которые никогда не будут превышать половины частоты киносъёмки: $v_{\text{э}}^* \leq v_{\text{с}}/2$. При этом лучи диска в изображении колеса будут смазанными.

Определим, при каких скоростях движения автомобиля возникают рассматриваемые искажения, называемые искажениями I рода. Для этого свяжем скорость движения автомобиля со скоростью вращения колеса.

Шины колеса характеризуются (рис. 3) посадочным диаметром D , шириной профиля B и высотой профиля H . Характеристики шины наносятся на её боковую поверхность: сначала ширина профиля B в миллиметрах; затем, после косой черты значение H/B , умноженное на 100; буква R , указывающая на радиальную конструкцию каркаса; и в конце — посадочный диаметр в дюймах. Например, для шины автомобиля ВАЗ 2109 — 165/70R13.

Тогда радиус качения колеса (в миллиметрах):

$$r_{\text{к}} = \left(\frac{H}{B} \cdot \frac{1}{100} \right) B + 12,7D. \quad (5)$$

Для рассматриваемого в качестве примера автомобиля ВАЗ 2109 радиус качения колеса составляет $r_{\text{к}} = 0,7 \cdot 165 + 12,7 \cdot 13 = 281$ мм. Размеры радиальных шин представлены в таблице 1, где радиус качения колеса рассчитан по формуле 5).

Скорость движения $v_{\text{а}}$ автомобиля связана с частотой $v_{\text{э}}$ следующей зависимостью:

$$v_{\text{а}} = 2\pi r_{\text{к}} \Pi_{\text{к}} = \frac{2\pi r_{\text{к}} v_{\text{э}}}{k}. \quad (6)$$

Таким образом, скорость движения автомобиля, при которой начинаются искажения воспроизведения частоты вращения колеса, линейно зависит от частоты киносъёмки $v_{\text{с}}$, количества лучей диска или отверстий в колесе k и радиуса качения колеса $r_{\text{к}}$. Очевидно, что чем больше $r_{\text{к}}$ и $v_{\text{с}}$ и чем меньше k , тем при большей скорости автомобиля его киноизображение будет записано без искажений. Например, если на колесо автомобиля установлена шина 225/70R15, а количество лучей диска колеса равно 3, то при телевизионной съёмке с частотой 25 кадр/с движение автомобиля будет записано без искажений в диапазоне скоростей от 0 до 32,8 км/час. А для шины 145/70R12 и 18 лучей диска колеса — от 0 до 4 км/час.

В таблице 2 приведены скорости движения автомобиля ВАЗ 2111, при которых в киноизображении видны искажения скорости вращения колёс, а в таблице 3 представлены максимальные скорости некоторых автомобилей, до которых киноизображение записывается при киносъёмке без искажений I рода.

Заметим, что в данном случае важна частота киносъёмки, а время экспонирования на появление искажений не влияет. От времени экспонирования зависит только величина «смаза» движущегося изображения (в нашем примере — колеса автомобиля).

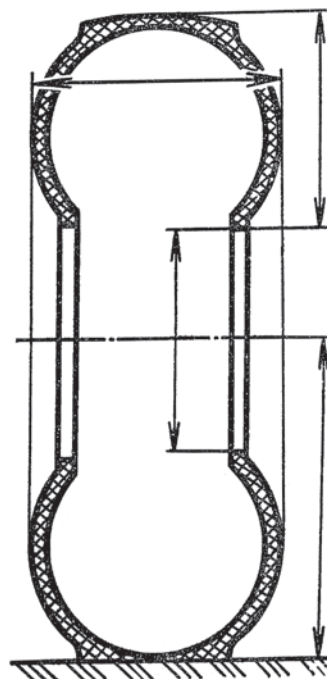


Рис. 3. Основные геометрические размеры шины колеса автомобиля: D — посадочный диаметр, B — ширина профиля, H — высота профиля, $r_{\text{к}}$ — радиус качения

Таблица 1. Соответствие размеров радиальных шин

№	Серия 80	Серия 70	Серия 65	Серия 60	Серия 55	Серия 50	Серия 45	Радиус качения гк, мм
1		145/70R12						254
2		155/70R12		165/60R13				261–264
3		145/70R13	155/65R13 165/65R13	175/60R13	195/55R13			266–272
4		155/70R13	165/65R13 175/65R13 155/65R14	185/60R13 165/60R14	195/55R13 185/55R14		195/45R15	272–279
5	135/80R13	155/70R13	165/65R13	175/60R13 185/60R13 165/60R14	195/55R13 185/55R14		195/45R15	270–280
6	145/80R13	165/70R13	175/65R13 165/65R14	185/60R13 175/60R14	185/55R14		195/45R15 215/45R15	278–288
7	155/80R13	175/70R13	175/65R14	205/60R13 185/60R14	185/55R15	195/50R15	215/45R15 195/45R16	287–292
8	165/80R13	185/70R13	185/65R14	195/60R14 205/60R14	195/55R15 205/55R15	205/50R15 195/50R16	205/45R16 225/45R16	293–304
9		195/70R13	195/65R14	205/60R14 195/60R15	205/55R15	225/50R15 195/50R16 205/50R16	225/45R16	301–307
10		205/70R13	185/65R15 195/65R15	205/60R15	225/55R15 205/55R16	225/50R16 205/50R17	245/45R16 215/45R17 225/45R17	309–318
11		165/70R14	175/65R14 185/65R14	185/60R14 195/60R14	185/55R15 195/55R15	205/50R15	195/45R16 205/45R16	291–298
12		175/70R14	185/65R14 195/65R14	205/60R14	195/55R15 205/55R15	225/50R15 195/50R16 205/50R16	225/45R16	298–306
13	165/80R14	185/70R14	195/65R14 185/65R15	195/60R15 205/60R15	225/55R15 205/55R16	205/50R16 225/50R16	245/45R16 215/45R17 225/45R17	305–317
14	175/80R14	195/70R14	195/65R15	205/60R15 215/60R15	225/55R15 205/55R16 215/55R16	225/50R16 235/50R16 205/50R17	245/45R16 215/45R17 225/45R17 235/45R17	313–322
15	185/80R14	205/70R14	205/65R15 215/65R15	215/60R15 225/60R15	225/55R16	235/50R16 245/50R16 215/50R17	235/45R17 245/45R17 255/45R17	320–331
16		195/70R14 175/70R15	185/65R15 195/65R15	205/60R15 215/60R15	225/55R15 205/55R16	225/50R16 205/50R17	245/45R16 215/45R17 225/45R17	311–320
17	165/80R15	205/70R14 185/70R15	195/65R15 205/65R15	215/60R15 225/60R15	215/55R16 225/55R16	235/50R16 245/50R16 205/50R17	235/45R17 245/45R17	317–327
18		195/70R15 205/70R15	205/65R15 215/65R15	215/60R16	225/55R16	245/50R16 255/50R16	245/45R17 255/45R17	326–332
19		205/70R15	225/65R15	215/60R16 225/60R16	245/55R16 225/55R17		245/45R18 255/45R18	334–343
20		215/70R15 225/70R15	215/65R16	235/60R16	225/55R17	235/50R18	255/45R18	340–348

Таблица 2. Качество записи изображения движущегося автомобиля ВАЗ 2111 при частоте киносъёмки 24 кадр/с

Количество лучей диска колеса	Скорость движения автомобиля		Характеристика качества записи киноизображения
	м/с	км/час	
5	$v < 4,34$	$v < 15,6$	Без искажений
8	$v < 2,71$	$v < 9,8$	
12	$v < 1,81$	$v < 6,5$	
5	$v = 4,34$	$v = 15,6$	Колесо неустойчиво неподвижно с удвоенным количеством спиц
8	$v = 2,71$	$v = 9,8$	
12	$v = 1,81$	$v = 6,5$	
5	$4,34 < v < 8,68$	$15,6 < v < 31,2$	Колесо в изображении вращается с меньшей скоростью и в противоположную сторону относительно реального колеса
8	$2,71 < v < 5,42$	$9,8 < v < 19,6$	
12	$1,81 < v < 3,62$	$6,5 < v < 13$	
5	$v = 8,68$	$v = 31,2$	Колесо в изображении неподвижно
8	$v = 5,42$	$v = 19,6$	
12	$v = 3,62$	$v = 13$	
5	$8,68 < v < 13,02$	$31,2 < v < 46,8$	Колесо вращается в правильном направлении, но с медленной скоростью
8	$5,42 < v < 8,13$	$19,6 < v < 29,4$	
12	$3,62 < v < 5,43$	$13 < v < 19,5$	

Таблица 3. Максимальные значения скорости автомобилей, до которых киноизображение при киносъёмке с частотой 24 кадр/с записывается без искажений I рода

Марка автомобиля	Количество лучей диска колеса	Максимальная скорость движения автомобиля, до которой в киноизображении не возникают искажения I рода	
		м/с	км/час
BMW 3 E39	3	7,8	28,1
	5	4,7	16,8
	8	2,9	10,5
	12	2	7
	18	1,3	4,7
Mazda RX-8	3	8,3	29,8
	5	5	17,9
	8	3,1	11,2
	12	2,1	7,5
	18	1,4	5
Audi Q7	3	9,3	33,5
	5	5,6	20,1
	8	3,5	12,5
	12	2,3	8,4
	18	1,5	5,6

Выводы

1. Современные средства киносъёмочной техники не обеспечивают исключения появления искажений киноизображения I рода при киносъёмке движущегося автомобиля.

2. Бездефектная киносъёмка возможна только при низких скоростях движения автомобиля, не превышающих значения $v_{a \max}$, получаемого из формулы 6) при v_3 , равном половине частоты киносъёмки.

3. Операторам при киносъёмке движущихся автомобилей рекомендуется использовать колеса с минимальным количеством симметрично расположенных одинаковых элементов (лучи, отверстия диска) или закрывать колеса декоративными сплошными дисками. Рекомендуется также проводить киносъёмку при скоростях движения автомобиля, не превышающих предварительно рассчитанной максимально возможной скорости $v_{a \max}$, при которой в киноизображении не возникают искажения I рода. Если это невозможно, то проводить киносъёмку таким образом, чтобы боковая сторона колёс не попадала в кадр. Можно снимать автомобиль и при скоростях, в несколько раз превышающих скорость $= v_{a \max}$. В этом случае колесо в киноизображении будет смазано, и зритель не сможет оценить частоту его вращения, а скорость движения автомобиля будет определяться зрителем по другим элементам кинофильма.

4. Изменение конструкций киносъёмочной аппаратуры с целью усиления фильтрации временных частот при дискретизации изображения, т. е. с целью подавления частот в изображении, превышающих $v_c/2$, возможно за счёт увеличения времени экспонирования t_3 до $t_3 > 2T_c$ [1]. Однако обеспечение такого времени экспонирования связано со значительными техническими трудностями. Кроме того, увеличение времени экспонирования приводит к увеличению «смаза» изображения движущихся объектов киносъёмки.

5. Устранение рассматриваемых искажений произойдёт при переходе кинематографа на более высокие частоты киносъёмки и кинопоказа до 50–60 кадр/с. При таких частотах, в результате фильтрующего действия глаза зрителя, искажения киноизображения I рода не воспринимаются зрителем, даже если они возникнут.

И следовательно, повышение частоты кинематографа позволит повысить качество киноизображения. ■

Литература

1. Гребенников О. Ф. Основы записи и воспроизведения изображения (в кинематографе). М.: Искусство, 1982.
2. Гребенников О. Ф., Тихомирова Г. В. Основы записи и воспроизведения информации (в аудиовизуальной технике): Учебное пособие. СПб.: Изд. СПбГУКИТ, 2002.
3. Игнатьев Н. К. Дискретизация и её приложения. М.: Связь, 1980.
4. Раев О. Н. Методика проектирования обтюраторов киносъёмочных аппаратов: Обзор. М.: НИКФИ. Вып. 5(112), 1989.



О МНОГОКАНАЛЬНОМ ЗВУКОВОСПРОИЗВЕДЕНИИ В КИНОТЕАТРАЛЬНОМ КИНЕМАТОГРАФЕ И НОВЫХ СТАНДАРТАХ для цифрового кино (продолжение)

Д. Г. Чекалин,
ОАО «НИКФИ»

■ Развитие цифровых технологий и их применение в кинематографе для звукозаписи позволило существенно повысить качество звуковоспроизведения, особенно в части шумоподавления и расширения динамического диапазона. Новые технологические возможности вызвали появление в начале 1990-х годов сразу нескольких новых цифровых звуковых киноформатов: Cinema Digital Sound (CDS), Dolby Stereo Digital, Sony Dynamic Digital Sound (SDDS) и Digital Theater Systems (DTS). Все новые системы задумывались и создавались для воспроизведения многоканального пространственного звучания в зрительном зале с целью имитации реального звукового поля для увеличения эффекта «присутствия» у зрителей.

Первым цифровым звуковым форматом для кино был разработанный «Optical Radiation Corporation» совместно с «Eastman Kodak» формат **Cinema Digital Sound (CDS)**, представленный в 1990 г. В этом формате звуковой сигнал записывался оптическим путём в виде пикселей очень малого размера на киноплёнке, специально разработанной для этого «Eastman Kodak». Благодаря высокому разрешению новой плёнки на месте обычной звуковой дорожки удалось разместить цифровую 6-канальную (5.1) фонограмму (рис. 6). В формате CDS звук записывается без сжатия, а для уменьшения объёма данных, вместо обычной 16-битной импульсно-кодовой модуляции (PCM) с линейной шкалой используется специальная, учитывающая особенности слухового восприятия человека, 12-битная логарифмическая шкала. Это позволило обеспечить превосходное звуковоспроизведение с динамическим диапазоном 90 дБ. Для повышения надёжности CDS была оснащена схемой обнаружения и коррекции ошибок.

Новый цифровой формат продемонстрировал беспрецедентное на тот момент качество звука на киноплёнке. «Optical Radiation Corporation» в формате CDS впервые реализовала в кино цифровое многоканальное звуковоспроизведение с независимыми отдельными широкодиапазонными звуковыми каналами и впервые представила технологию звуковоспроизведения по схеме 5.1, которая сейчас популярна в различных системах показа. За экраном размещаются громкоговорители трёх полнодиа-

пазонных фронтальных каналов: левый, центральный и правый. В зале устанавливаются громкоговорители двух полнодиапазонных каналов окружающего звука. Отдельно выделен канал сверхнизких частот. Новый формат с независимыми отдельными каналами не только повысил качество воспроизведения звука, но и позволил снять ограничения, вызванные и накладываемые матричным кодированием при создании и микшировании фонограмм в аналоговых форматах Dolby, что позволило расширить художественные и творческие возможности при записи звука к фильмам. Однако, несмотря на все неоспоримые преимущества нового формата, в нём было сделано всего несколько фильмов, основной причиной чему стала технологическая несовместимость с уже существующими звуковыми киноформатами. Цифровая оптическая звуковая дорожка формата CDS располагалась на 35-мм фильмокопии вместо аналоговой дорожки фотофонограммы на том же самом месте, что не давало возможности использования обычной аналоговой дорожки в качестве резервной в случае сбоя при воспроизведении цифровой фонограммы (как в более поздних цифровых форматах), а также требовало изготовления дополнительных прокатных фильмокопий для показа только в цифровых кинотеатрах с соответствующими дополнительными организационными и финансовыми затратами.

В последующих разработках ошибки были учтены, и традиционная оптическая аналоговая фонограмма в дальнейшем оставалась на киноплёнке на своём месте в неприкосновенности. В цифровых форматах Dolby Stereo Digital (и его модификация Surround EX) и SDDS цифровые звуковые дорожки также размещаются непосредственно на фильмокопии, однако из-за недостатка физического места на плёнке возможно размеще-



Звуковая дорожка CDS

Рис. 6. Расположение цифровой фонограммы формата Cinema Digital Sound (CDS) на 35-мм фильмокопии

ние ограниченного объёма цифровых данных, поэтому применяется компрессия данных. Разработчики утверждают, что применяемые ими методы кодирования хотя и осуществляются с потерями, но основаны на удалении только «избыточной», с точки зрения физиологии восприятия, информации. Например, в киноформате Dolby Stereo Digital шесть звуковых дорожек оцифрованы с частотой дискретизации 48 кГц и закодированы по алгоритму AC3 в цифровой поток с битрейтом 320 кбит/с (для сравнения: в обычном компакт диске звук записывается без компрессии и скорость цифрового звукового потока составляет 1411 кбит/с для двухканальной фонограммы). В AC3 применена оригинальная технология «перцептуального кодирования», основанная на психоакустических особенностях слухового восприятия человека. Эта технология предполагает удаление «избыточной» статистической и психофизической информации из звукового сигнала при его цифровом кодировании с целью уменьшения скорости цифрового потока и объёма передаваемых данных при максимальном сохранении качества субъективного восприятия декодированного звука. Используется свойство человеческого восприятия слышать при одновременном звучании нескольких различных звуковых сигналов только наиболее громкие звуки, которые в определённой мере маскируют все остальные более слабые сигналы. Сигналы более низких частот обладают лучшим маскирующим эффектом, сигналы, звучащие сразу после или перед громким звуком, также маскируются. Это явление позволяет кодировать маскируемые сигналы с меньшей разрядностью или не кодировать их вовсе. Неравномерная частотная чувствительность человеческого слуха делает возможным кодирование с максимальной достоверностью только той части частотного звукового диапазона, которая наиболее значима для человека, а потери в низкочастотном и высокочастотном (начиная с 5000 Гц) диапазонах будут не столь заметны. Ещё одним существенным способом сокращения потока данных является объединение одинаковых данных из разных каналов фонограммы, что применимо на частотах выше 10 кГц без риска нарушения локализации источников звука. В результате вышеперечисленных операций алгоритм AC3 позволяет записывать на киноплёнку менее 10% исходной звуковой информации фонограммы. Стоит обратить внимание, что, несмотря на очень «умный» алгоритм сжатия данных, в этом случае в итоге **удаляется более 90% исходной звуковой информации.**

В киноформате **Dolby Digital** (1991 г.) используется схема звуковоспроизведения 5.1, а в его модификации 1999 г. **Dolby Digital Surround EX** применяется технология записи и воспроизведения каналов окружающего звука по схеме 6.1. Практически этот формат отличается от предыдущего только добавлением третьего тылового (центрального) канала окружающего звука, размещаемого в зале позади зрителя. С точки зрения технологии, дополнительный шестой канал получен с помощью применения метода матричного кодирования (как в аналого-

вом Dolby stereo) и закодирован в стереоканале окружения формата 5.1. Таким образом, в формате Dolby Digital Surround EX для каналов окружающего звука присутствуют все вызванные матричным кодированием ограничения, характерные для аналогового Dolby stereo. Однако, несмотря на некоторый технологический регресс и частичное возвращение к матричному кодированию, новый формат позволяет заметно расширить возможности воспроизведения окружающего звука и даёт дополнительные творческие возможности. Новый формат Surround EX появился во время производства фильма «Звёздные войны: Эпизод I – Скрытая угроза», и его необходимость определялась творческими требованиями авторов к фонограмме фильма. Два канала окружающего звука зала не могли передать все эффекты, задуманные в фильме. Помимо выравнивания качества звука по всей площади кинозала появление тылового центрального канала позволяет воспроизводить новые эффекты, как, например, плавное перемещение звука в кинозале на 360°, а также делает возможным перемещение звуковых образов между задним рядом и киноэкраном по любой траектории, увеличивая реалистичность.

Фирма «Sony» разработала свой цифровой киноформат **Sony Dynamic Digital Sound (SDDS)**, который был продемонстрирован в 1993 г. с фильмом «Последний герой» («Last Action Hero»). К моменту создания SDDS почти всё свободное место на фильмокопии оказалось занято другими звуковыми форматами, однако инженеры «Sony» всё же решили записывать фонограмму непосредственно на киноплёнку и разместили звуковую дорожку в виде оптического раstra на единственном свободном месте – на краях киноплёнки за пределами перфорации, при этом фонограммы с двух краёв плёнки дублируют друг друга и в сочетании с мощной схемой коррекции ошибок обеспечивают надёжную передачу потока данных. Применённая схема коррекции ошибок позволяет воспроизводить цифровую фонограмму без сбоя в местах склеек или в случае её повреждения с одного из краёв киноплёнки. Для дополнительной защиты в случае отказа цифровой звуковой фонограммы предусмотрен автоматический переход декодера на воспроизведение звукового сигнала с аналоговой фонограммы. Использование на оптической фонограмме раstra из пикселей с размером, несколько меньшим, чем у Dolby, и пространства по всей длине плёнки позволяют записывать 8 звуковых каналов с не очень большим коэффициентом сжатия (примерно 5:1). В формате SDDS восьмиканальный 16-битный звук с частотой дискретизации 44,1 кГц кодируется со сжатием с потерей данных, однако использование алгоритма ATRAC (впервые применён на мини-дисках) и достаточно низкий коэффициент сжатия обеспечивают очень высокое качество звучания. Главное отличие этого формата состоит в применении восьми независимых цифровых каналов по схеме 7.1. За экраном размещены громкоговорители пяти полнодиапазонных фронтальных каналов: левый, левый центральный, центральный, правый

центральный и правый. В зале устанавливаются громкоговорители двух полнодиапазонных каналов окружающего звука. Отдельно выделен канал сверхнизких частот SW. Новый формат фактически использует все лучшие наработки своих предшественников и предусматривает совместимость с другими уже существующими форматами. Для совместимости нового формата с уже установленным в кинотеатрах оборудованием других форматов разработчики SDDS предусмотрели возможность декодирования восьмиканальной (7.1) фонограммы в шестиканальную (5.1) или в четырёхканальную, а для демонстрации фильмов, изначально записанных в формате 5.1, декодер SDDS может искусственно создавать левый центральный и правый центральный каналы.

В киноформате **DTS** (и его модификации **DTS-ES**) применён другой принцип – на киноплёнке размещён только синхронизирующий тайм-код, а вся звуковая информация помещается на отдельном внешнем носителе, что позволяет избежать проблемы с дефицитом места для размещения звуковой информации непосредственно на фильмокопии. В формате DTS на киноплёнке рядом с аналоговой дорожкой печатается только узкая дорожка временного кода (в виде последовательности чёрточек длительностью 5–12,5 мс), которая считывается при демонстрации фильма специальной оптической головкой, установленной на кинопроекторе, и обеспечивает кадровую синхронизацию с фонограммой, записанной на отдельном внешнем носителе. При сбое сигнала синхронизации в течение нескольких секунд звук будет по-прежнему воспроизводиться с цифровой фонограммы, и если сигнал временного кода не восстановится, то произойдет переключение воспроизведения звука на аналоговую фонограмму. При восстановлении сигнала синхронизации процессор снова переключится на формат DTS. В DTS применяется запись на дисках CD-ROM и сжатие данных для 16-битных звуковых сигналов с частотой дискретизации 44,1 кГц по алгоритму apt-X100 (разработан компанией «Audio Processing Technology») с коэффициентом сжатия 4:1, что обеспечивает поток данных 882 кбит/с и позволяет разместить на одном диске 100 минут шестиканального (5.1) звука с динамическим диапазоном 96 дБ. Формат DTS предполагает запись пяти звуковых каналов по схеме 5.1, при этом три фронтальных канала – левый, центральный и правый (L-C-R) – записаны в полном звуковом диапазоне (20 Гц–20 кГц), а канал сабвуфера (SW) располагается на дорожке стереоканала окружающего звука (LS-RS) на частотах ниже 80 Гц, и таким образом стереоканал окружения ограничен снизу частотой 80 Гц. В 1999 г. (практически одновременно с Dolby Digital Surround EX и с аналогичным технологическим решением) в кинотеатрах начинается коммерческое использование новой модификации формата DTS-ES (Extended Surround), взаимно совместимого с традиционным DTS и отличающегося от него наличием дополнительного центрального тылового канала окружающего звука, обеспечивающего звуковоспроизведе-

ние по схеме 6.1. Дополнительный канал кодируется матричным способом, по тому же принципу, как и в системе Dolby Stereo. Формат DTS благодаря более совершенному алгоритму и меньшему сжатию данных превосходит по качеству звука формат Dolby Digital и является его основным конкурентом. Для звуковоспроизведения в формате DTS в кинотеатр кроме фильмокопии привозят еще и компакт-диск с фонограммой фильма, однако это кажущееся дополнительное технологическое неудобство позволяет использовать одни и те же фильмокопии в прокате по всему миру, дополнительно изготавливая лишь компакт-диски с различными вариантами фонограммы на разных языках. Кроме того, наличие на фильмокопии синхронизирующего временного кода при установке в киноаппаратной дополнительного оборудования – системы субтитров DTS-CSS (Cinema Subtitling System) – позволяет обеспечивать для стандартных фильмокопий синхронный показ на киноэкране субтитров или текстового сопровождения, используя для этого небольшой видеопроектор. Система текстового сопровождения разработана для людей, страдающих дефектами слуха, и отличается от субтитров тем, что она более информативна: описывает звуковые эффекты, во время диалогов указывает говорящий, сообщается о месте действия. Для слепых и людей с частичной потерей зрения на специальные инфракрасные наушники, позволяющие хорошо слышать основное звуковое сопровождение, в промежутках между диалогами дополнительно транслируется запись диктора, в которой описываются сцена и происходящее действие. Запись фонограммы кинофильма на отдельном носителе в формате DTS имеет определённые достоинства: во-первых, теоретически не ограничивает разработчика в объёме потока звуковой информации, а во-вторых, позволяет легко изменять звуковое сопровождение к уже напечатанным фильмам, например, при переводе фильма на ещё один язык или при появлении новой версии звукового формата.

Сейчас в кинотеатрах используются три аналоговых звуковых формата – моно (для старых фильмов), Dolby A (для старых фильмов), Dolby stereo SR; и три цифровых формата – Dolby Stereo Digital (и его модификация Surround EX), DTS (и его модификация DTS-ES) и SDDS. Звуковые дорожки всех этих цифровых и одного из аналоговых форматов могут быть одновременно размещены на одной и той же фильмокопии (рис. 7). Аппаратура для воспроизведения всех этих звуковых форматов может быть одновременно установлена в одном и том же кинозале и на одних и тех же кинопроекторах без помех друг для друга. Так как ни один из цифровых форматов не мешает другому, современные фильмы часто выходят одновременно в двух, а иногда и в трёх цифровых форматах. Наиболее совершенным по качеству звуковоспроизведения и количеству каналов и одновременно наименее распространённым является формат SDDS. А наибольшее распространение получил (наихудший с точки зрения цифрового сжатия) формат Dolby Stereo

Digital, что отчасти объясняется его меньшей стоимостью, простотой и успешной политикой производителя.

В настоящее время проводится рассмотрение и утверждение международных стандартов для цифрового кинематографа в ISO (Международная организация по стандартизации). Примечателен тот факт, что в качестве международных стандартов ISO предлагаются без каких-либо изменений принятые в 2006 г. стандарты SMPTE (Общество инженеров кино и телевидения). Для цифрового звуковоспроизведения в качестве проектов международных стандартов были предложены: «ISO 26428-2 / Digital cinema (D-cinema) distribution master – Part 2: Audio characteristics/» и «ISO 26428-3 / Digital cinema (D-cinema) distribution master – Part 3: Audio channel mapping and channel labeling/», являющиеся точным воспроизведением стандартов SMPTE – SMPTE 428-2-2006 и SMPTE 428-3-2006, соответственно.

Оба стандарта относятся к разделу Digital Cinema Distribution Master (DCDM) и определяют требования к цифровой прокатной мастер-копии фильма и размещению громкоговорителей. В этих стандартах предлагается уточнённая терминология и определяется возможность использования в Digital Cinema Distribution Master (цифровой прокатной мастер-копии фильма) до 16 звуковых каналов с максимальным разрешением до 24-бит и частотой дискретизации 48 кГц или 96 кГц, а так же предлагается несколько вариантов различных форматов и схем размещения громкоговорителей (таблица 1):

- одноканальный вариант (один громкоговоритель в центре)
- двухканальный вариант (два громкоговорителя за экраном)
- четырёхканальный вариант (три громкоговорителя за экраном и один канал окружения в зале)
- шестиканальный вариант (три громкоговорителя за экраном, два канала окружения в зале и один низкочастотный канал)
- семиканальный вариант (три громкоговорителя за экраном, три канала окружения в зале и один низкочастотный канал)
- восьмиканальный вариант (пять громкоговорителей за экраном, два канала окружения в зале и один низкочастотный канал)
- девятиканальный вариант (пять громкоговорителей за экраном, три канала окружения в зале и один низкочастотный канал).

Помимо вышеперечисленных схем размещения, традиционных для кино, так же оговаривается возможность применения дополнительных каналов (таблица 2) и громкоговорителей (в том числе размещённых в

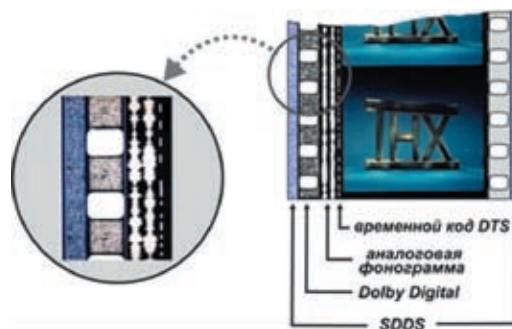


Рис. 7. Размещение современных звуковых форматов на 35-мм фильмокопии

верхней части экрана, в потолке над зрителями, сбоку от экрана за его пределами, а так же дополнительные локализованные громкоговорители на боковых стенах зрительного зала). Размещение всех возможных громкоговорителей (включая дополнительные) приведено на схеме (рис. 8). Предусмотренные в стандарте дополнительные каналы рассчитаны на перспективу и позволяют разрабатывать и создавать новые звуковые форматы в рамках предложенного стандарта.

Не остаются в стороне и разработчики телевизионных систем. В научно-исследовательской лаборатории японской телерадиовещательной корпорации NHK, в которой был создан стандарт HDTV, разрабатывается новый телевизионный стандарт следующего поколения – UHDTV (Ultra High Definition TV) или телевидение сверхвысокого разрешения. В новом формате предусматривается более 33 млн. элементов изображения с максимальным разрешением до 7680 x 4320 и частотой кадровой развёртки –

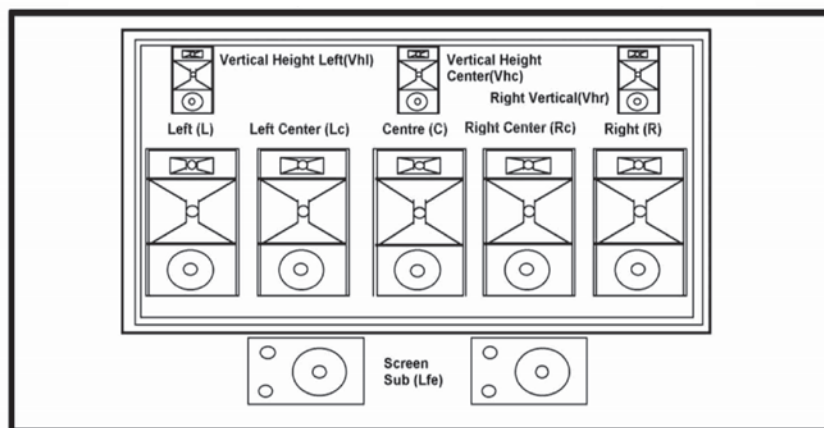
Таблица 1. *Обозначение и маркировка каналов и громкоговорителей в проекте 2007 г. стандарта ISO/DIS 26428-3 для цифрового кинематографа*

AES Pair No. / Ch No.	Channel No.	Label / Name	Description
1/1	1	L/Left	Far left screen loudspeaker
1/2	2	R/Right	Far right screen loudspeaker
2/1	3	C/Center	Center screen loudspeaker
2/2	4	LFE/Screen	Screen low frequency effects sub-woofer loudspeakers
3/1	5	Ls/Left surround	Left wall surround loudspeakers
3/2	6	Rs/Right surround	Right wall surround loudspeakers
4/1	7	Lc/Left center	Mid left to center screen loudspeaker
4/2	8	Rc/Right center	Mid right to center screen loudspeaker
5/1	9	Cs/ Center surround	Rear wall surround loudspeakers
5/2	10		SMPTE reserved
6/1	11		SMPTE reserved
6/2	12		SMPTE reserved
7/1	13		SMPTE reserved
7/2	14		SMPTE reserved
8/1	15		User defined
8/2	16		User defined

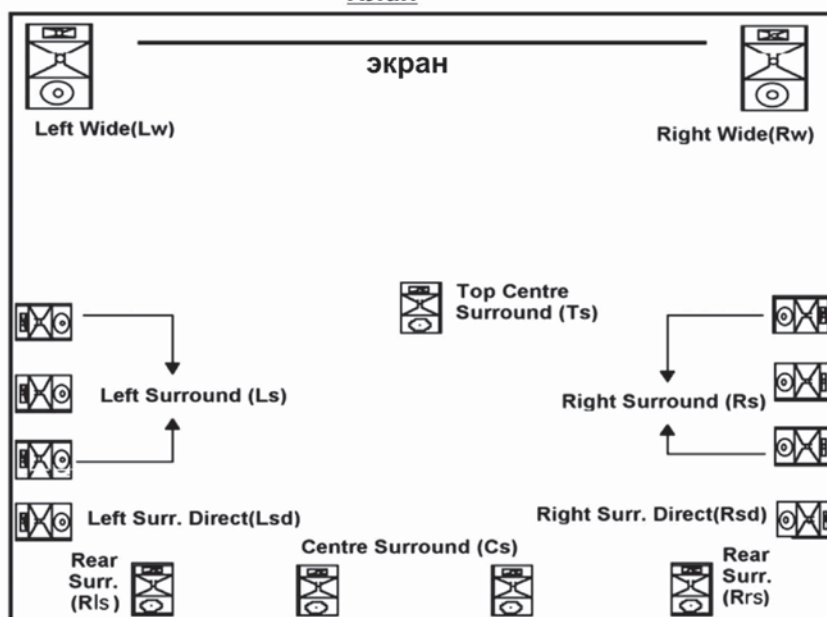
Таблица 2. *Обозначение и маркировка дополнительных каналов и громкоговорителей в проекте 2007 г. стандарта ISO/DIS 26428-3 для цифрового кинематографа*

Name	Label	Description
Vertical height left	Vhl	Far left top of screen loudspeaker
Vertical height center	Vhc	Center top of screen loudspeaker
Vertical height right	Vhr	Far right top of screen loudspeaker
Top center surround	Ts	Center of the theatre ceiling loudspeakers
Left wide	Lw	Outside the screen, front left loudspeaker
Right wide	Rw	Outside the screen, front right loudspeaker
Left surround direct	Lsd	Left surround single loudspeaker for localized directionality
Right surround direct	Rsd	Right surround single loudspeaker for localized directionality
LFE 2	Lfe2	Low frequency effects subwoofer style loudspeaker
Rear surround left	Rls	Rear wall left loudspeaker/s
Rear surround right	Rrs	Rear wall right loudspeaker/s
Hearing impaired	HI	Dynamic range compressed dialog centric mix for the hearing
Narration	VI-N	Narration for the visually impaired

Размещение акустических систем за экраном



План



60 кадров в секунду. Для телеформата сверхвысокого разрешения разработана новая 24-х канальная система стереофонического звуковоспроизведения с конфигурацией по схеме 22.2 (рис. 9).

Система состоит из трёх разнесённых по вертикали уровней громкоговорителей и обеспечивает высокое качество звучания во всём зале. В нижнем уровне установлены три громкоговорителя под экраном и два сабвуфера низкочастотных звуковых каналов. Средний уровень состоит из громкоговорителей 10-ти звуковых каналов: три за экраном, два по бокам от экрана и пять на стенах по периметру зала. Верхний уровень образуется из громкоговорителей 9-ти каналов, три из которых размещены над экраном, пять (как и в среднем уровне) на стенах по периметру зала и один находится на потолке над зрителями. Технология Ultra High Definition, разработанная японской телерадиовещательной корпорацией NHK впервые была публично продемонстрирована на выставке Expo 2005 в Японии. Демонстрация проводилась в специально построенном зале, рассчитанном на 400 зрителей с проекционным экраном размером 600 дюймов (рис. 10). Правительство Японии совместно с частными компаниями планирует начать вещание в новом формате в 2015 году и сделать его международным стандартом.

Особо следует отметить принципиально новый перспективный подход к созданию системы объёмного звука. В настоящее время получили широкое распространение исследования, связанные с системой, предложенной в 1980-е годы профессором Берхаутом из Технического Университета в городе Дельфт (Голландия), и получившей название Wave Field Synthesis (WFS — Синтез волнового поля).

Принцип звуковоспроизведения по технологии WFS принципиально от-

Рис. 8. *Размещение громкоговорителей в проекте 2007г. стандарта ISO/DIS 26428-3 для цифрового кинематографа.*

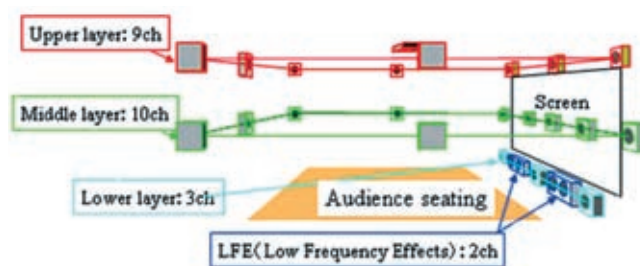


Рис. 9. Конфигурация 24 канальной аудиосистемы (по схеме 22.2) формата UHDTV компании NHK



Рис. 10. Демонстрационный зал системы Ultra High Definition TV на выставке Expo 2005.

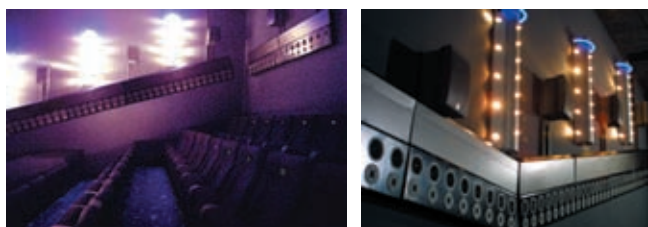


Рис. 11. Установка Iosono

личается от многоканальной стереофонии. Объёмное звучание в классической стереофонической системе с отдельными дискретными источниками звука (громкоговорителями) осуществляется благодаря субъективному эффекту психоакустического сложения нескольких звуковых сигналов коррелированных источников звука, а при технологии WFS осуществляется физический синтез реального волнового звукового поля, аналогично принципу оптической голографии. В этом случае возможно воссоздание во вторичном помещении звукового поля, полностью идентичного по структуре исходному первичному звуковому полю, и возможно обеспечение локализации виртуальных источников во всей зоне слушательских мест и по всем направлениям, что принципиально недостижимо для всех стереофонических систем. Воспроизведение трёхмерного звукового поля по технологии WFS производится с помощью массива громкоговорителей, распределённых по всем поверхностям зрительного зала, причём расстояние между громкоговорителями в идеале должно быть меньше половины длины волны самого высокого звука в воспроизводимом сигнале. В современных экспериментальных моделях используются только линейки громкоговорителей, расположенные по стенам помещения, что пока позволяет воссоздавать цилиндрическое звуковое поле в горизонтальной плоскости, а не полное сферическое. Работы в этом направлении активно проводятся в крупнейших европейских университетах и научных организациях: Технический университет в Дельфте (Голландия), Институт IRT (Германия), IRCAM (Франция), Studer (Швейцария), Университет Аристотеля (Греция) и др. В этом же направлении проводятся работы в Институте медиатехнологий Фраунгофера — директор института Карлхайнц Бранденбург (Karlheinz Brandenburg) совместно с коллегами разработали новую технологию создания трёхмерного звука, получившую название Iosono, и создали действующий

образец системы включающей более 400 громкоговорителей (рис. 11).

Дальнейшее развитие систем пространственного звука скорее всего будет осуществляться по двум направлениям. Существующие системы будут развиваться в сторону уменьшения компрессии (вплоть до её полного устранения) и будут оснащаться всё большим числом дискретных каналов записи и воспроизведения звука и размещением громкоговорителей по всем направлениям от зрителя, в том числе в верхней части экрана и на потолке, с целью полного охвата зрителей окружающим звуком, в соответствии с замечанием одного из пионеров стереофонии Х. Флетчера: «стереофоническая система — это не два, три или любое другое фиксированное число каналов. Их должно быть столько, чтобы создавалась иллюзия бесконечного их количества». Альтернативно и независимо от этого будут также создаваться и разрабатываться системы (по принципу Wave Field Synthesis), позволяющие полностью воссоздавать в кинозале структуру первичного звукового поля, аналогично оптической голограмме, и создающие у зрителей полный эффект «присутствия». ■

Литература и информационные ресурсы

1. Алдошина И. А. Многоканальные пространственные системы. // Шоу-Мастер. 2003. №2.
2. Алдошина И. А. Пространственные системы синтеза волнового поля – Wave Field Synthesis. // Шоу-Мастер. 2005. №4.
3. Белкин Б. Г. Стереофония в кино. // Техника кино и телевидения. 1984. №1.
4. Высоцкий М. З. Большие экраны и стереофония. М.: «Искусство», 1966.
5. Карагосян М. Многоканальный звук в кино. // Install Pro. 2000. №3.
6. Ковалгин Ю. А. Стереофония. М.: «Радио и связь», 1989.
7. Тарасенко Л. Г., Чекалин Д. Г. Кинозрелища и киноаттракционы. Справочник. М.: «Парадиз», 2003.
8. www.dolby.com
9. www.iosono-sound.com
10. www.kino-proekt.ru
11. www.nhk.or.jp/digital
12. www.smpte.org



ТРЁХМЕРНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

В настоящее время значительно возрос интерес к кинематографу с трёхмерным изображением, особенно в США и России. Ряд авторитетных специалистов в области техники кинематографии высказывает мнения о том, что следует ожидать в близком будущем нового этапа в развитии кинематографии: широкого применения кинематографа, в котором объёмное изображение формируется на основе бинокулярного зрения человека.

Цифровые методы формирования трёхмерного изображения ещё не достигли такого высокого уровня разрешения, при котором можно было передавать как горизонтальные, так и вертикальные параллаксы в кинематографическом и телевизионном изображениях. Отсутствие таких возможностей обуславливает ряд серьёзных недостатков стереоскопического изображения, таких как: повышенное зрительное напряжение (нарушение естественного процесса восприятия из-за несоответствия диспаратности), искажения в передаче ракурса при небольших смещениях головы зрителя и др.

Наиболее перспективным является создание системы театрального кинематографа с трёхмерным изображением на основе голографических процессов.

Отдельные статьи и доклады, опубликованные в этом номере журнала, которые, на первый взгляд, кажутся далёкими от кинематографа, на самом деле, возможно, закладывают основы технологии кинематографа будущего. Некоторые материалы не относятся непосредственно к вопросам формирования изображения (например, голографические методы защиты от несанкционированного отбора), тем не менее, они весьма актуальны для современной кинематографии.

В. Г. Комар, д.т.н., профессор
ОАО «НИКФИ»



ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА «ГОЛОИНИД»

для индивидуализации и идентификации защитных голограмм

Д. С. Лушников, С. Б. Одинокоев, А. Ю. Павлов, МГТУ им. Н. Э. Баумана

Рассмотрены недостатки существующих методов защиты материальных объектов от подделки. Предложен альтернативный метод защиты, основанный на создании в защитных голограммах скрытых кодированных микроизображений при помощи лазерной микроперфорации. Описан алгоритм кодирования для получения защитной голограммы со скрытым кодированным микроизображением, а также алгоритм регистрации и декодирования скрытого кодированного микроизображения для идентификации защитной голограммы. Рассмотрен алгоритм работы разработанного программно-аппаратного комплекса для индивидуализации и идентификации защитных голограмм со скрытым кодированным микроизображением.

■ Актуальность разработки и применения программно-аппаратного комплекса «ГОЛОИНИД» связана с возрастающей потребностью защиты от массовой подделки материальных объектов. От подделки страдают аудиовидеопродукция и программное обеспечение, произведения искусства, бумажные документы (банкноты и ценные бумаги, нотариальные документы, удостоверения личности и сертификаты и т. п.), дорогостоящие эксклюзивные товары известных марок и изделия массового производства (парфюмерия, спиртные напитки, сигареты, лекарственные препараты и т. д.), кредитные карты и т. п. Рост подделок обусловлен значительным прогрессом в области копировальной и полиграфической техники, а также вычислительных средств совместно с устройствами ввода-вывода. Это привело к тому, что в настоящее время традиционные методы защиты не могут успешно противостоять копированию и имитации.

1. Анализ методов защиты материальных объектов от подделки

Среди распространённых на сегодняшний момент методов защиты можно выделить следующие:

- полиграфический метод, основанный на создании специальных защитных элементов в виде микроизображений, штрих-кодов, бар-кодов и др. при помощи полиграфической печати;
- голографический метод, основанный на процессе формирования защитных элементов на стадии получения мастер-голограммы [1-9];
- метод лазерной нумерации, заключающийся в нанесении серии и номера на изделие (в частности, на голограмму) при помощи лазерного нумератора.

Исторически первым появился полиграфический метод, однако он на данный момент как самостоятельный (отдельный) метод защиты практически не используется. Это связано с доступностью практически профессиональной полиграфической аппаратуры для рядового потребителя, вследствие чего возможность подделки большинства широко используемых полиграфических элементов защиты не представляет большого труда. Радужные защитные голограммы и голографические защитные элементы в них на какое-то время смогли удовлетворить потребность в качественной защите изготовителей и потребителей различного рода товаров и документов. Однако на сегодняшний момент данный способ защиты как самостоятельный также не применяется, что связано с тем, что все голографические защитные элементы вносятся в голограмму ещё на стадии получения оптической мастер-голограммы. Это приводит к тому, что все защитные элементы с данной мастер-голограммы будут одинаковыми для всей партии голограмм, поскольку данная партия получена путём тиражирования одной и той же мастер-голограммы. Кроме того, вследствие присутствия в каждой голограмме из партии одинаковых защитных голографических элементов возникает невозможность идентификации каждой голограммы в отдельности (индивидуализации голограммы). Для устранения данного недостатка каждая голограмма подвергается лазерной нумерации. При этом появляется возможность индивидуализировать, а следовательно, и идентифицировать каждую голограмму в отдельности. Однако лазерная нумерация не является достаточно надёжным методом защиты голограмм, поскольку производится, в основном, не с целью их защиты, а скорее —

с целью учёта. Данный элемент голограммы не является скрытым, наблюдается визуально и, следовательно, существует возможность его подделки.

Наиболее эффективным на настоящий момент считается комбинированный способ защиты товара или документа от подделки. Такой способ включает в себя полиграфические и голографические элементы защиты, а, кроме того, также и лазерную нумерацию. Это позволяет усложнить процесс подделки полученного таким способом комбинированного защитного элемента, однако значительно удорожает процесс его получения. Кроме того, комбинированный защитный элемент по-прежнему будет обладать недостатками всех своих составляющих защитных компонентов.

Поэтому возникла необходимость разработать новый метод защиты голограмм, а, следовательно, и маркированных ими изделий и документов от подделки. Основными требованиями к защитному элементу, полученному по вновь разработанному методу, являются простота получения данного защитного элемента, а также сложность его повторения (подделки). Данный защитный элемент должен быть различен на разных голограммах одной серии, что позволит не только контролировать подлинность голограмм, но и отличать одну голограмму от другой.

В качестве нового защитного элемента, позволяющего защитить голограмму от подделки, было выбрано **скрытое кодированное микроизображение**. Данное изображение вносится в голограмму при помощи лазерной микроперфорации уже на конечном этапе производства серии голограмм, то есть уже после тиражирования.

2. Состав и принцип работы программно-аппаратного комплекса «ГОЛОИНИД»

С ростом объёма производства защитных голограмм растёт также потребность в приборах и системах контроля подлинности защитных голограмм, а также их индивидуализации. Разработанный программно-аппаратный комплекс «ГОЛОИНИД» предназначен для получения, регистрации и декодирования (в случае необходимости) скрытых микроизображений, зарегистрированных на защитной голограмме путём лазерной

перфорации. При защите голограмм от подделки решаются следующие задачи:

- индивидуализация защитных голограмм с помощью лазерной микроперфорации в виде скрытых кодированных изображений;
- идентификация и контроль подлинности защитных голограмм путём считывания скрытых кодированных микроизображений.

Программно-аппаратный комплекс «ГОЛОИНИД» включает в себя:

- лазерный микроперфоратор для индивидуализации защитных голограмм;
- оптико-электронный прибор считывания микроизображений для идентификации защитных голограмм.

Фотографии лазерного микроперфоратора и оптико-электронного прибора считывания микроизображений показаны на рис. 1а и 1б соответственно.

Кроме того, в состав комплекса входит специализированное программное обеспечение, позволяющее получать микроизображения с помощью лазерного микроперфоратора, а также обработать полученные при помощи оптико-электронного прибора считывания микроизображения по определённому алгоритму и принимать решение о подлинности голограмм.

Принцип действия комплекса следующий:

Полупроводниковый лазер лазерного микроперфоратора через систему зеркал и объективов подсвечивает сфокусированным пучком заданную область на защитной голограмме. За счёт высокой плотности мощности лазерного излучения, получаемой в сфокусированном пятне, происходит лазерная перфорация термлакового (с покрытием алюминия) слоя защитной голограммы.

Оптико-электронный прибор считывания микроизображений для идентификации защитных голограмм работает следующим образом: защитная голограмма с микроизображением, полученным лазерной перфорацией, подсвечивается некогерентным источником излучения. Далее микроизображение проецируется объективом на фоточувствительную площадку видеокамеры. Затем сигнал с камеры выводится из устройства по кабелю в



Рис. 1а. Фотография лазерного микроперфоратора для индивидуализации защитных голограмм



Рис. 1б. Фотография оптико-электронного прибора считывания микроизображений для идентификации защитных голограмм

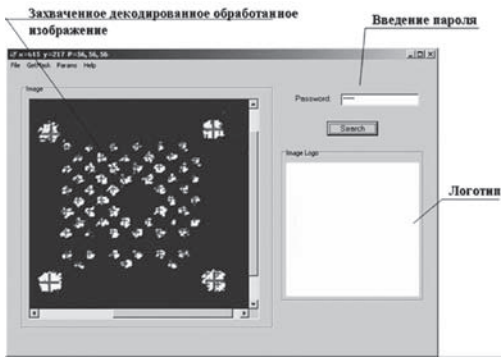


Рис. 2. Программное обеспечение для определения подлинности защитных голограмм со скрытыми кодированными микроизображениями.

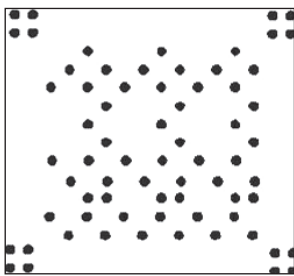


Рис. 3а. Модель скрытого кодированного микроизображения

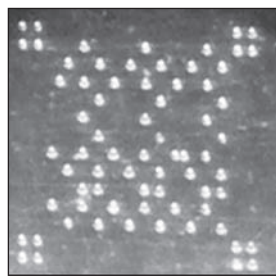


Рис. 3б. Фотография скрытого кодированного микроизображения

персональный компьютер. Полученное изображение обрабатывается при помощи специализированного программного обеспечения по определённому алгоритму, и выносится решение о подлинности голограммы, а также производится её идентификация. На рис. 2 представлен вариант данного программного обеспечения.

На рис. 3а представлена модель скрытого кодированного микроизображения, а на рис. 3б – фотография соответствующего скрытого кодированного микроизображения, которое перфорируется на защитной голограмме. Скрытое кодированное микроизображение представляет собой совокупность набора оптических бит, которые составляют информационное поле, и реперных объектов для захвата и обработки изображения.

На рис. 4 представлены возможные варианты лазерной микроперфорации. Ноу-хау технологии состоит в возможности лазерной микроперфорации как в слое термолака, который лежит между слоями лавсана и металлизированным слоем (для самоклеящейся радужной голограммы), так и в возможности лазерной микроперфорации непосредственно в металлизированном слое (для радужной голограммы на фольге горячего тиснения). При этом при перфорировании в слое термолака, в случае для самоклеящейся голограммы, такую перфорацию невозможно подделать механически, так как при этом нарушится слой лавсана, или на лазерных граверах с длиннофокусной оптикой, так как в этом случае возможно разрушение слоя лавсана и металлизированного слоя.

3. Алгоритмы кодирования для получения защитной голограммы со скрытым кодированным микроизображением и регистрации и декодирования скрытого кодированного микроизображения для идентификации защитной голограммы

В процессе создания комплекса ГОЛОИНИД был разработан алгоритм кодирования для получения защитной голограммы со скрытым кодированным микроизображением (для лазерного микроперфоратора). Суть алгоритма состоит в следующем:

Этап №1. Получение «бинарного слова» (скрытого кодированного микроизображения). На данном этапе при помощи программного или аппаратного генератора случайных чисел получается так называемое «бинарное слово», которое представляет собой набор цифр «0» и «1». При этом в скрытом кодированном микроизображении за отсутствие информационной точки отвечает «0», а за её наличие – «1».

Этап №2. Сохранение скрытого кодированного микроизображения, пароля и информации о носителе, маркированном защитной голограммой. На данном этапе в базу данных вводятся: «бинарное слово» как интерпретатор скрытого кодированного микроизображения, информация о носителе, маркированном защитной голограммой, и пароль, позволяющий получить доступ к процессу идентификации голограммы. Пароль может представлять собой переведённую в буквы часть «бинарного слова», что позволит однозначно связать между собой скрытое кодированное микроизображение и пароль.

Этап №3. Перфорация скрытого кодированного микроизображения. На данном этапе из «бинарного слова» формируется структура микроизображения. Также в него вносятся реперные объекты, необходимые на стадии считывания данного микроизображения. Далее микроизображение передаётся на лазерный перфоратор, производится определение режимов перфорации (мощность излучения при перфорации, длительность импульса и т. д.), а затем скрытое кодированное микроизображение перфорируется в защитной голограмме.

Также в процессе создания комплекса ГОЛОИНИД был разработан алгоритм регистрации и декодирования

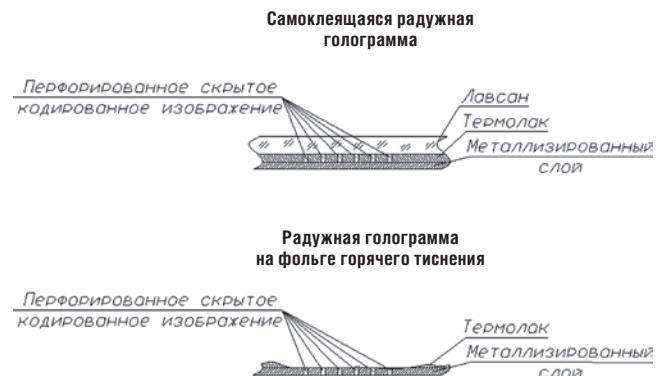


Рис. 4. Варианты лазерной микроперфорации на различных типах носителей

скрытого кодированного микроизображения для идентификации защитной голограммы (для опико-электронного прибора считывания микроизображений для идентификации защитных голограмм). Суть алгоритма состоит в следующем:

Этап №1. Считывание скрытого кодированного микроизображения. На данном этапе при помощи опико-электронного прибора считывания микроизображений для идентификации защитных голограмм производится считывание микроизображения. После этого изображение передаётся на компьютер.

Этап №2. Обработка считанного микроизображения. На данном этапе производится привязка изображения к координатной сетке с использованием реперных объектов, производится распознавание информационных точек, после чего полученному микроизображению ставится в соответствии «бинарное слово» (информационной точке в «бинарном слове» соответствует «1», а отсутствию информационной точки в узле сетки соответствует «0»).

Этап №3. Идентификация голограммы. Производится сравнение полученного «бинарного слова» с эталонным, которое достаётся из базы данных по введённому паролю. В случае совпадения проверяемого «бинарного слова» с эталонным «бинарным словом» из базы данных передаётся информация, соответствующая носителю, маркированному данной защитной голограммой.

4. Преимущества комплекса ГОЛОИНИД по сравнению с аналогами

Область применения опико-электронного комплекса ГОЛОИНИД связана с определением подлинности таких носителей, маркированных защитными голограммами, как:

- бумажные документы (банкноты и ценные бумаги, нотариальные документы, удостоверения личности и сертификаты и т. п.);
- дорогостоящие эксклюзивные товары известных марок и изделия массового производства (парфюмерия, спиртные напитки, сигареты, лекарственные препараты и т. д.), произведения искусства;
- аудио-видеопродукция и программное обеспечение, кредитные карты и т. д.

В настоящее время разработанный опико-электронный комплекс ГОЛОИНИД работает с защитными голограммами, нанесёнными на пластиковые карты стандартного размера 85,6 x 51 мм. При необходимости возможна доработка комплекса для работы с носителями любого типа.

Преимущества лазерного микроперфоратора для индивидуализации защитных голограмм как одного из компонентов комплекса ГОЛОИНИД перед аналогами заключаются в том, что он способен получать скрытое кодированное микроизображение в голограммах, не разрушая поверхностных слоёв самих голограмм. Это достигается за счёт использования в микроперфораторе светосильной короткофокусной оптики.

Преимущества опико-электронного прибора идентификации защитных голограмм как одного из компонентов комплекса ГОЛОИНИД перед аналогами состоят в следующем:

- высокая вероятность правильной идентификации проверяемой голограммы;
- отсутствие потребности в дополнительных устройствах для ввода и обработки восстановленного декодированного изображения на компьютере;
- портативность устройства.

5. Выводы

По разработанным алгоритмам кодирования, регистрации и декодирования скрытого кодированного микроизображения при идентификации защитной голограммы создан программно-аппаратный комплекс ГОЛОИНИД. Данный комплекс позволил создать и проконтролировать новый защитный элемент для голограммы – скрытое кодированное микроизображение.

В результате проведённых исследований удалось получить скрытое кодированное микроизображение в термолаковом слое радужной самоклеящейся голограммы со следующими параметрами:

- размер информационной точки 50..70 мкм;
- период между точками 40..70 мкм

При этом время получения скрытого кодированного изображения размером 6x12 информационных точек составило 40 сек., а время идентификации защитной голограммы с перфорированным на ней микроизображением такого размера – 5 сек. ■

Литература

1. John E. Wreede at al. Encoded hologram for producing a machine readable and a human readable image. Patent USA No 5, 499, 116 of Mar. 12, 1996.
2. Гальперн А. Д. Голографическое устройство для воспроизведения кодирующих элементов. Патент Российской Федерации № 2110411 от 10.05.1998.
3. Бобринев В. И., Гуланян Э. Х. Голограммы с протяжённым опорным источником. Квантовая электроника. 1971. Вып. 4.
4. Songcan Lai. Security holograms using an encoded reference wave. Optical Engineering, vol.35, No 9, September 1996.
5. Refregier P., Javidi B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding. Opt. Lett. 1995. V. 20, N. P. 767–769.
6. Javidi B., Sergent A., Zhang G., Guibert L. Fault tolerance properties of a double phase encoding encryption technique. Opt. Eng. 1997. V. 36, No 4. P. 992–998.
7. Javidi B., Zhang G., Li J. Experimental demonstration of the random phase encoding technique for image encryption and security verification. Opt. Eng., 1996., V. 35, No 9, p. 2506–2512.
8. Бондарев Л. А., Куракин С. В., Курилович А. В., Одинокоев С. Б., Смык А. Ф. Устройство для контроля подлинности голограмм. Патент Российской Федерации № 2103741 от 27.01.1998.
9. David B., Pizzanelly J. Holograms for security markings. Patent USA No 5, 623, 347 of Apr. 22, 1997.



Модернизация схемы записи радужных голограмм для получения кинетических эффектов на глубине. Голографический элемент БИГРАММА

В. И. Сябер, И. Й. Погань, И. В. Твердохлеб, А. А. Ивановский,
СП «ГОЛОГРАФИЯ», г. Киев, Украина

■ По глубине сцены голограммы можно разделить на двумерные 2D и трёхмерные 3D. Существует также промежуточный тип 2D/3D, когда трёхмерная сцена состоит из плоскостей, которые расположены на разной глубине. 2D голограммы могут быть реализованы множеством различных технологий: дот-матрикс, фрейм-матрикс, оптическая запись решёток, электронно-лучевая литография и т. д. Изображения формируются из дифракционных решёток с различной пространственной частотой и ориентацией штрихов. Среди достоинств таких голограмм можно выделить высокую яркость, детализацию, чёткость. Легко реализуются кинетические эффекты – иллюзия движения отдельных частей изображения при изменении условий наблюдения, например, при наклоне или повороте голограммы. Перечисленные технологии позволяют также записывать и трёхмерные многоракурсные голограммы, но их качество обычно уступает аналоговой оптической записи, поскольку дискретизация дизайна по ракурсам приводит к значительному снижению яркости и разрешения. Переключения между ракурсами происходят не плавно, а ступенчато. Горизонтальный параллакс таких голограмм значительно меньше, чем у радужных голограмм.

На наш взгляд, для получения трёхмерных голограмм лучше всего использовать классическую технологию радужных голограмм Бентона, предложенную еще в далеком 1969 году.

Схема записи двухэтапная. На первом этапе объект съёмки (фотошаблоны) размещают перед фотопластинкой и освещают его расширенным лазерным пучком. Второй пучок – опорный – направляют непосредственно на фотопластинку, перед которой размещена щелевая

маска (рис. 1). После проявления получают первичную голограмму Н1, которая восстанавливает объект только при освещении монохроматическим светом. При полихромном освещении разноцветные изображения накладываются друг на друга со сдвигом и объект наблюдать не удаётся.

На втором этапе голограмму Н1 освещают сопряжённым опорным пучком (рис. 4). Результат интерференции восстановленного волнового фронта объекта с опорным

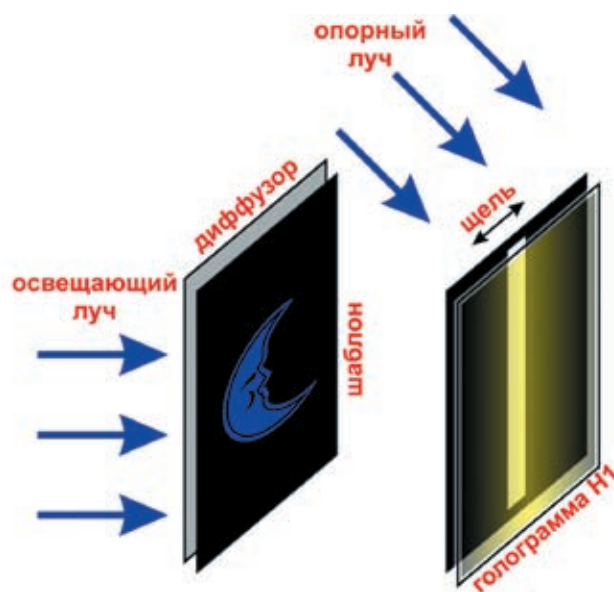


Рис. 1. Запись амплитудного шаблона на голограмму Н1

пучком регистрируется на фотопластинке Н2. Полученную вторичную голограмму можно наблюдать в белом свете; использование щелей при записи Н1 приводит к тому, что изображения, восстанавливаемые разными длинами волн оказываются разнесёнными в пространстве и не накладываются друг на друга при наблюдении. Вертикальный параллакс отсутствует, но на восприятии трёхмерности изображения это не сказывается, т. к. горизонтальный параллакс более важен в данном случае.

2D/3D радужные голограммы восстанавливают достаточно яркие и глубокие изображения, но только статичных сцен. Для повышения защитных свойств такие «аналоговые» голограммы комбинируют с «цифровыми», т. е. часть дизайна (обычно фон) записывается при помощи 2D/3D технологии, а 2D плоский передний план – дот-матрикс или электронно-лучевой литографией. Таким образом, совмещают достоинства двух технологий: трёхмерность изображения, яркость, кинетику, высокие чёткость и разрешение.

Мы предлагаем технологию, позволяющую записывать трёхмерные радужные голограммы, в которых элементы, содержащие кинетические эффекты, находятся на глубине.

Сначала одной из известных технологий (дот-матрикс, электронно-лучевая литография) записывается часть дизайна с кинетикой, например, «летающая звезда» (рис. 2). Полученную голограмму мы используем в качестве голографического шаблона при записи Н1 в классической схеме регистрации 2D/3D радужных голограмм наряду с обычными (амплитудными) шаблонами. Так как голографический шаблон – это фазовая структура, то на голограмме Н1 регистрируем только дифрагировавший свет (рис. 3). Поэтому на этапе синтеза голографической маски необходимо рассчитывать частоты и ориентации решёток, чтобы свет попадал на Н1 через щелевую маску. Расчёт производится по формулам:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\sin \Omega \sin \gamma}{\sqrt{\sin^2 \gamma + \sin^2 \varphi + 2 \cos \Omega \sin \varphi \sin \gamma}}\right)$$

$$p = \frac{\lambda}{\sqrt{\sin^2 \gamma + \sin^2 \varphi + 2 \cos \Omega \sin \varphi \sin \gamma}}$$

$$\Omega = \arctan\left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha}\right) + \frac{\pi}{2},$$

где φ – угол падения лазерного пучка, α, β, γ – углы между дифрагировавшим пучком и осями X, Y, Z соответственно; p – период решётки; θ – угол между штрихами и осью X ; λ – длина волны света.

При записи Н2 голографическая маска с кинетикой восстанавливается на расчётной глубине вне плоскости фоторезиста (рис. 4). Таким образом, наблюдается трёхмерная иллюзия движения. Данная технология существенно улучшает эстетические и защитные свойства классических радужных голограмм, поскольку голографическое изображение отличается оригинальными оптическими эффектами. ■



Рис. 2. Кинетическое плоское изображение, записанное технологией дот-матрикс

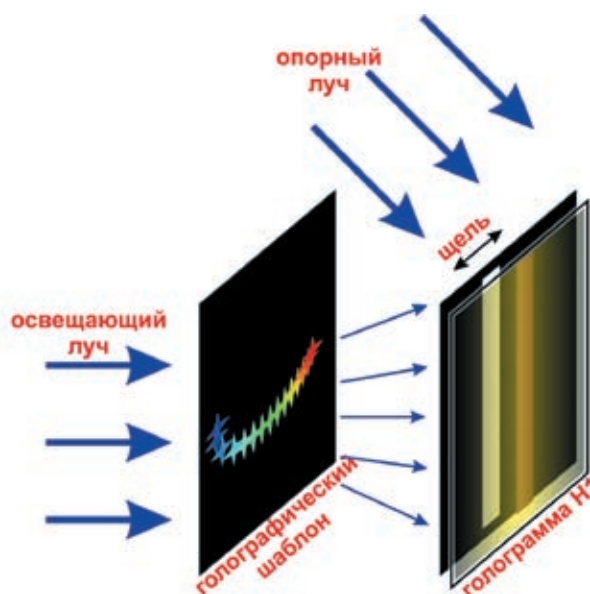


Рис. 3. Запись голографической маски на Н1

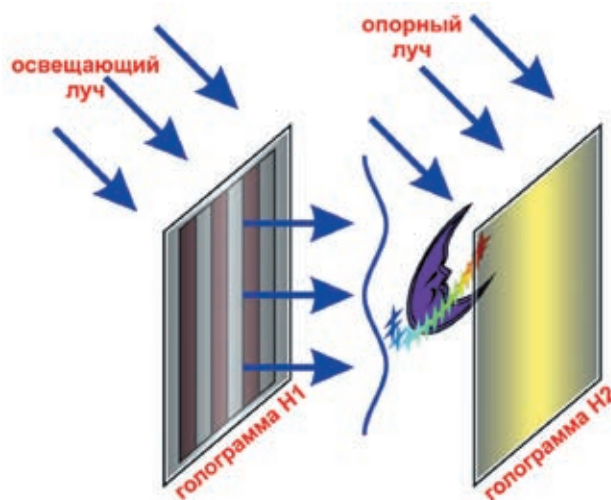


Рис. 4. Запись вторичной голограммы Н2



ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА

А. Г. Полещук, Институт автоматики и электрометрии
СО РАН, г. Новосибирск

Введение

Дифракционная оптика, как следует из самого названия, основана на принципах дифракции, в то время как в основе обычной оптики лежат законы отражения и преломления света.

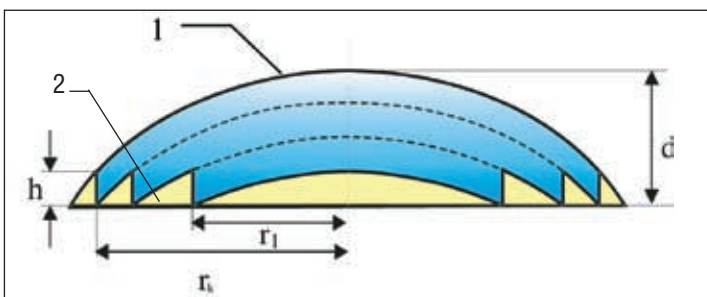
Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) не являются конкурентами традиционной оптики. В своё время революция в радиоэлектронике, вызванная созданием транзисторов, а затем микросхем, привела к появлению новых отраслей промышленности и в корне изменила нашу жизнь. Похожая ситуация складывается и в оптике. Основу классической оптики составляют линзы, призмы, зеркала. Эти элементы уже давно достигли пределов совершенства. Дальнейшее развитие оптики связывают с широким практическим применением дифракционных элементов, которые представляют собой тонкие стеклянные пластинки, одна из сторон которых имеет рельеф с поперечными размерами и глубиной в доли микрона. Такие элементы могут заменять сложные объективы, преобразовывать по заданному закону лазерное излучение, формировать изображения объектов, рассчитанных компьютером. Использование плоских оптических элементов в оптике открывает перспективу создания дешёвых, лёгких, компактных и функционально сложных оптических приборов. Диапазон применения ДОЭ очень широк: от искусственных хрусталиков глаза человека до оптики космических телескопов. Сейчас уже можно сказать, что оптика будущего будет во многом основана на их использовании.

Потенциальные возможности дифракционных элементов сдерживаются отсутствием доступных методов изготовления поверхностного рельефа. Фирма Intel, вложив сотни миллионов долларов в развитие нанотехнологий, создала микропроцессоры с размерами проводников в несколько десятков нанометров. Структура поверхности ДОЭ имеет минимальные размеры около половины длины волны света (0.1-0.5 мкм), однако общие размеры могут достигать метров в диаметре, что во много раз больше размеров кристалла микросхемы. Кроме того, микрорельеф поверхности ДОЭ имеет очень сложную трёхмерную форму. Поэтому методы изготовления ДОЭ существенно отличаются от методов изготовления микросхем.

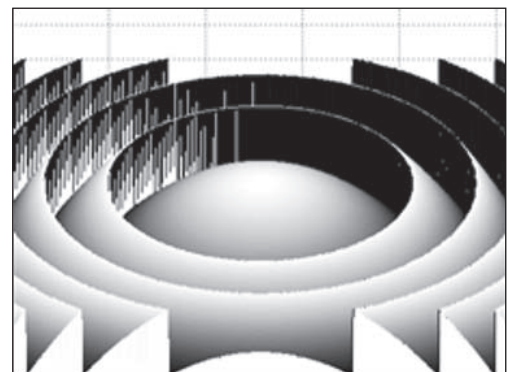
Дифракционная оптика – это обобщённый термин. Часто используются различные названия: компьютерная оптика, бинарная оптика, плоская оптика, голографическая оптика и т. д. В любом случае, речь идёт об оптических элементах, отличительной особенностью которых является использование явления дифракции света на микроструктурах с пространственной вариацией глубины и ширины.

Дифракционные оптические элементы

Как устроена дифракционная линза и каковы её отличия от традиционной рефракционной линзы? Мы приводим пример с линзой, поскольку линза – это базовый элемент, как классической, так и дифракционной оптики. Она предназначена для фокусировки света и построения



а) Рис. 1. Преобразование плоско-выпуклой линзы в дифракционную линзу (а) и её трёхмерная модель (б).



б)

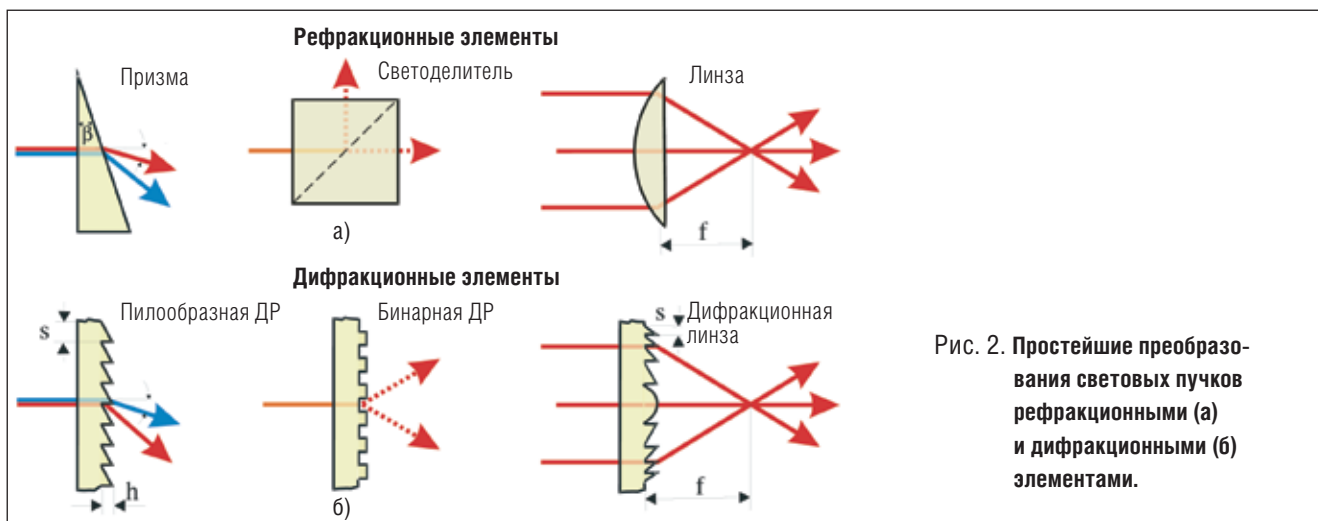


Рис. 2. Простейшие преобразования световых пучков рефракционными (а) и дифракционными (б) элементами.

изображений объектов, т. е. для геометрических и волновых преобразований световых пучков.

На рис. 1а представлена обычная плоско-выпуклая линза 1 и приведён геометрический способ построения на её основе дифракционной структуры 2. Для этой цели линза разделена на тонкие сферические слои одинаковой толщины (штриховые линии). Радиусы слоёв равны радиусу кривизны сферической поверхности линзы, а их толщина равна величине $h = N\lambda/(n-1)$, где λ – длина волны света, N – целое число, n – коэффициент преломления материала линзы. На рис. 1а, в качестве примера, показано четыре слоя. В действительности, если линза имеет толщину, например, $d = 5\text{мм}$, то при $\lambda = 0.5\text{мкм}$, $n = 1.5$ (стекло) и $k = 1$ число сферических слоёв толщиной 1мкм будет равно 5000. Различные слои можно объединять в ступенчатую структуру 2 линиями, параллельными оптической оси. Полученная конфигурация 2 называется зонной пластинкой или дифракционной линзой. Очень важной и полезной особенностью дифракционной линзы является её очень малая толщина. В нашем примере она составляет всего 1мкм . При одинаковой оптической силе толщина дифракционных линз может быть в тысячи раз меньше, чем у классических.

На рис. 2 показаны простейшие преобразования световых пучков, которые выполняют рефракционные и дифракционные элементы: поворот, светоделение и фокусировка. Простейшая призма (рис. 2а) отклоняет световой пучок на угол $\alpha_p = \beta(n-1)$. Дифракционный аналог призмы – дифракционная решётка с пилообразной формой рельефа (решётка с «блеском») отклоняет свет на угол $\alpha_d = \lambda/s$, где s – период решётки, причём угол отклонения растёт с увеличением длины волны. Такая решётка будет отклонять в заданном направлении до 100% энергии светового потока, если выполняется условие $\alpha_d = \alpha_p = h(n-1)/s$, т. е. микрорельеф

действует как набор микропризм. Если рельеф решётки будет иметь прямоугольную (бинарную) форму и глубину в два раза меньше, чем у пилообразной решётки, то световой пучок разделится на два равных пучка (рис. 2б).

Дифракционная линза не просто является аналогом обычной рефракционной линзы, а имеет существенное преимущество: она фокусирует световой пучок в пятно, определяемое только дифракцией на её апертуре. То есть тонкая дифракционная линза заменяет сложный многолинзовый объектив (рис. 3).

Методы формирования микрорельефа дифракционных элементов

Большинство оптических систем обладает вращательной симметрией относительно оптической оси, поэтому в ИАиЭ СО РАН было разработано устройство, предназначенное для изготовления высококачественных ДОЭ в полярной системе координат. Подложка, покрытая светочувствительным слоем, вращается с постоянной угловой скоростью, в то время как сфокусированный записывающий пучок лазерного излучения перемещается вдоль прямой линии, пересекающей центр вращения (рис. 4а). Это позволяет значительно увеличить скорость записи. Известно, что лазерное излучение можно сфокусировать в пятно с размером меньше длины волны све-

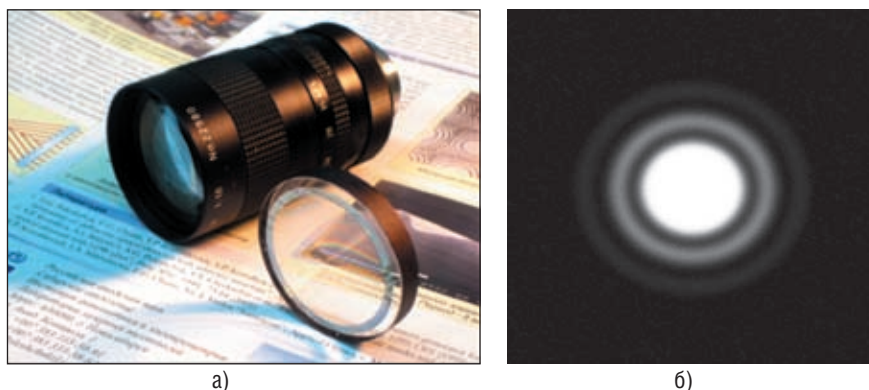


Рис. 3. Многолинзовый объектив и превосходящая его по качеству, изготовленная в ИАиЭ СО РАН дифракционная линза (а) и фотография лазерного пятна, сфокусированного дифракционной линзой с числовой апертурой $NA=0.65$ (б)

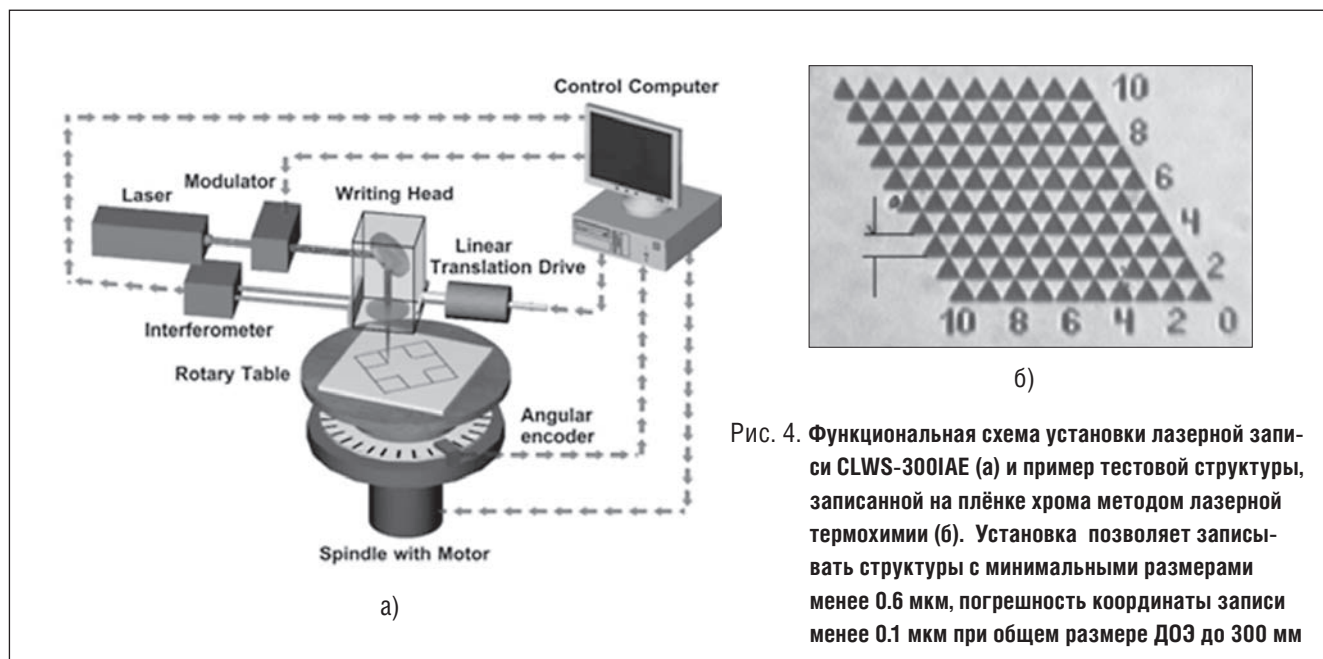


Рис. 4. Функциональная схема установки лазерной записи CLWS-300IAE (а) и пример тестовой структуры, записанной на плёнке хрома методом лазерной термохимии (б). Установка позволяет записывать структуры с минимальными размерами менее 0.6 мкм, погрешность координаты записи менее 0.1 мкм при общем размере ДОЭ до 300 мм

та (~ 0.5 микрона) и получить в нём высокую плотность мощности – тысячи мегаватт на квадратный сантиметр. Расположенное в фокусе вещество может быть практически мгновенно нагрето до температуры в несколько тысяч градусов. Управляя от компьютера перемещением лазерного пятна и мощностью лазерного излучения, можно придать поверхности некоторых материалов требуемые свойства. В качестве светочувствительного материала нами, в частности, используются плёнки хрома, в которых под действием нагрева, вызванного лазерным излучением, возникает скрытое «термохимическое» изображение. Это позволяет производить прямую запись высококачественных дифракционных амплитудных элементов, синтезированных голограмм, штриховых и угловых шкал, кодовых дисков, сеток и различного рода фотошаблонов.

В дифракционной оптике используются элементы, как с прямоугольным, так и с пилообразным профилем поверхности. На рис. 5 показаны разработанные в ИАиЭ СО РАН методы изготовления микрорельефа ДОЭ с прямоугольным (а) и пилообразным (б) профилем. Создание рельефа с прямоугольным профилем (рис. 5а) начинается с нанесения тонкой плёнки хрома, толщиной примерно 50-80 нм, на поверхность оптической пластины. Далее на этой пластинке проводится запись необходимой структуры сфокусированным пучком мощного лазера. Было установлено, что аморфные плёнки хрома после воздействия излучения меняют свою внутреннюю структуру, а на их поверхности образуется тонкий слой окислов хрома. Управляя от компьютера перемещением лазерного пятна и мощностью лазерного излучения, можно создать в плёнке хрома скрытое изображение, которое затем проявляется в селективном проявителе: чистый хром быстро растворяется, а экспонированные участки остаются. Таким образом, формируется микроструктура из хрома на поверхности пластины. Для полу-

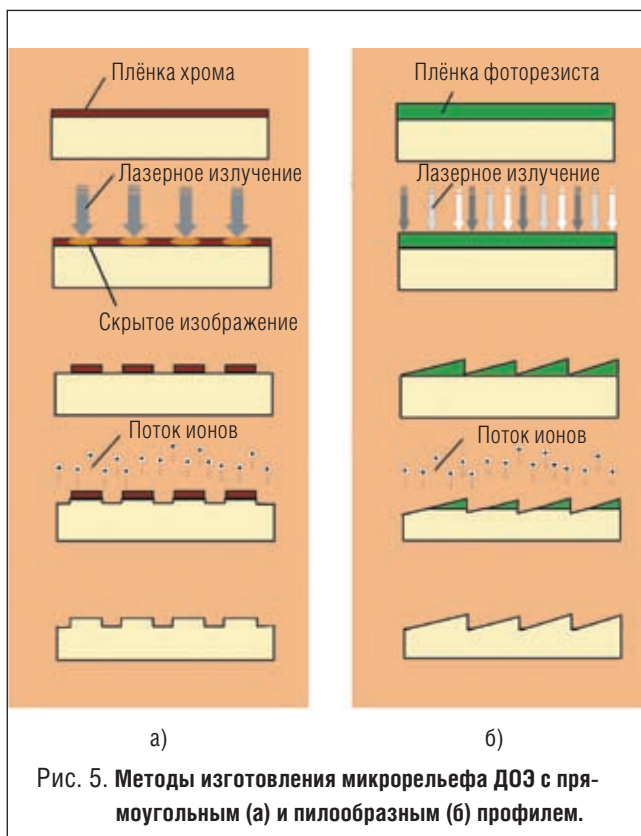


Рис. 5. Методы изготовления микрорельефа ДОЭ с прямоугольным (а) и пилообразным (б) профилем.

чения рельефа в стекле, проводится реактивное ионное травление. После получения рельефа нужной глубины, остатки хрома стравливаются, и дифракционный элемент с бинарным рельефом готов. Таким путём удастся получить дифракционные структуры с минимальными размерами в доли микрона.

Лазерная технология создания рельефа с пилообразной и любой другой формой поверхности представлена на рис. 5б. На первом этапе на пластину наносится тонкая плёнка фоторезиста, толщиной 1-2 мкм. Фоторезист

обладает свойством изменять скорость растворения в проявителе почти в линейной зависимости от величины экспозиции: т. е. меняя величину экспозиции, можно изменить толщину плёнки. Для формирования рельефа поверхность плёнки экспонируется движущимся сфокусированным лазерным пучком, причём мощность излучения меняется по заданному закону. После проявления в плёнке образуется рельеф с заданной формой. На последнем этапе проводится реактивное ионное травление, и рельеф из плёнки фоторезиста переносится в материал пластины. Примеры такого рельефа приведены на рис. 6.

Практические применения дифракционной оптики

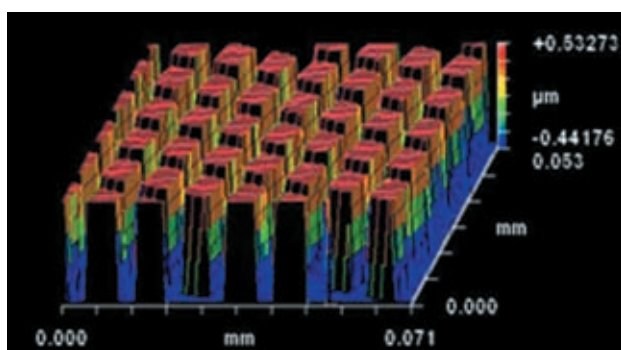
В настоящее время ДОЭ уже широко применяется на практике. В ряде случаев их применение открывает совершенно новые уникальные возможности.

Телескопы остаются в настоящее время самыми мощными инструментами познания вселенной. Создание Галилеем в 1609 году первого телескопа сразу принесло множество открытий. Первый телескоп имел диаметр 5 см. За 4 столетия размер зеркал телескопов достиг

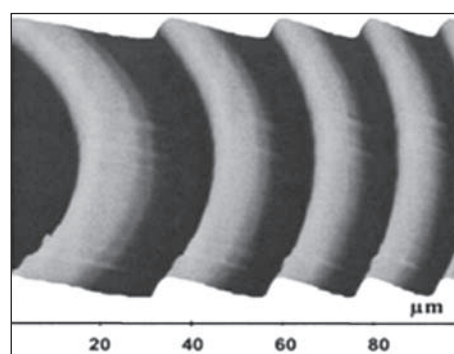
10 м, и уже есть проекты создания гигантских телескопов с размером зеркал в 25, 50 и 100 м. Такие телескопы, базируясь на земле (атмосферные турбулентности устраняются адаптивной оптикой), позволят разглядеть на Луне предмет размером в мяч и различить планеты земного типа у ближайших звёзд.

Однако оказалось, что изготовить гигантское многометровое зеркало мало, надо его тщательно проверить. Иначе огромный труд будет потерян (такие зеркала изготавливаются по несколько лет и стоят миллионы долларов). Асферическая поверхность зеркала телескопа должна быть выполнена с точностью в десятки нанометров. Для обработки поверхности зеркала нужен эталон, с которым оптики постоянно бы сравнивали результаты своего труда. Оказалось, что ДОЭ, обладающие свойством преобразовывать форму волнового фронта, идеально подходят для этой цели.

В ИАиЭ СО РАН разработаны и реализованы на практике два основных варианта контроля асферических зеркал. Согласно первому варианту (рис. 7а), ДОЭ непосредственно преобразует форму исходного волнового фронта лазерного интерферометра в асферический волновой

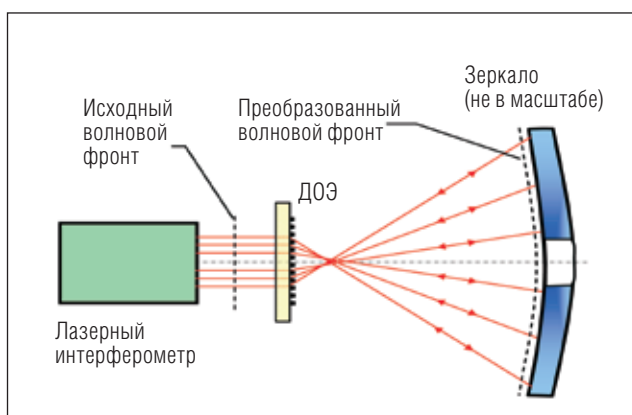


а)

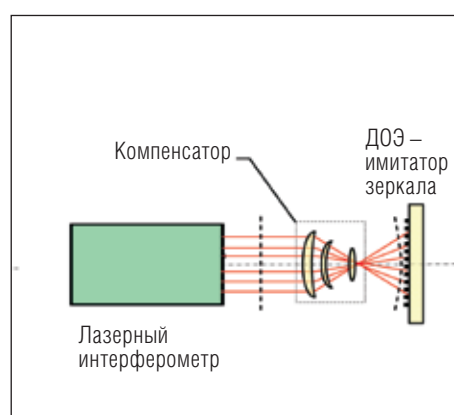


б)

Рис. 6. Примеры поверхностей дифракционных элементов с бинарным (а) и пилообразным (б) профилем, изготовленные методами прямой лазерной записи в ИАиЭ СО РАН.



а)



б)

Рис. 7. Оптические системы для измерения формы поверхности зеркал: ДОЭ выполняет роль корректора (а) и ДОЭ выполняет роль имитатора зеркала (б).

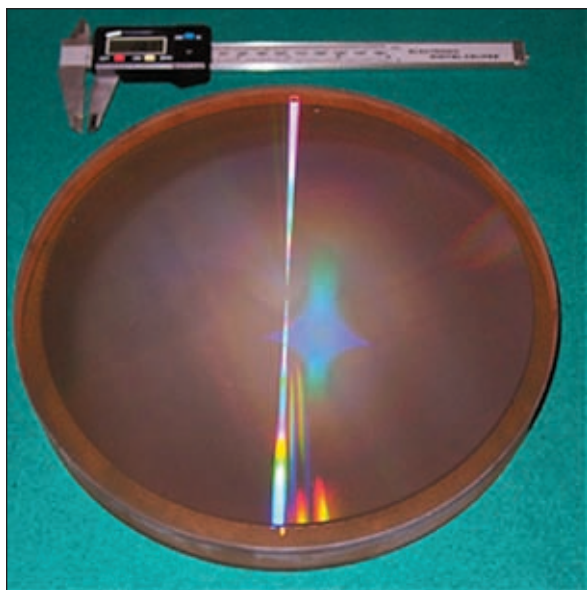


Рис. 8. Внешний вид ДОЭ для проверки 8.4-м зеркала ББТ



а)



б)

Рис. 9. Большой бинокулярный телескоп (2 зеркала $f/1.14$ диаметром 8.4 м) перед вводом в эксплуатацию (а) и изображение галактики NGC891, полученное этим телескопом (б)

фронт, который точно соответствует форме поверхности контролируемого зеркала. Оптический прибор – интерферометр, измеряет разность между этим фронтом и поверхностью зеркала в долях длины волны света.

Согласно второму варианту (рис. 7б), преобразование волнового фронта производилось многолинзовой системой (корректором), а вместо большого контролируемого зеркала, для калибровки, ставится его имитатор – отражательный ДОЭ относительно небольшого размера. Дифракционная структура этого элемента отражает световой поток назад точно так, как это бы делало идеальное зеркало. В процессе работы оптики поочередно могут сравнивать форму полируемого зеркала с эталоном, которым является имитатор.

Метод контроля астрономических зеркал с применением ДОЭ был разработан относительно недавно и сейчас применяется при создании всех больших зеркал. Толчком к его применению послужила история с космическим телескопом Хаббл, когда зеркало диаметром 2.4 м было отполировано без применения дифракционного имитатора, в результате чего форма его поверхности стала всего на 0.5 микрона отличаться от заданной. Но это в 10 раз ухудшило разрешающую способность телескопа. Понадобилась специальная экспедиция в космос на корабле Шаттл для ремонта телескопа.

Особенностью ДОЭ для контроля астрономических зеркал, является их большие размеры – до 250 мм при минимальных размерах дифракционной структуры около 0.5 мкм. Причём все зоны на поверхности такого ДОЭ должны быть нанесены с погрешностью менее 50 нм (рис. 8). Предложенный метод лазерной записи в полярной системе координат позволил создать ДОЭ для контроля любых зеркал, как существующих, так и проектируемых. В ИАиЭ СО РАН изготовлены ДОЭ для контроля 6.5- и 8.4-метровых зеркал телескопов Магеллан и Большой бинокулярный телескоп (ББТ), созданных в Стюардсовской обсерватории университета Аризоны, г. Туссон, Аризона, США. ДОЭ позволили выявить и устранить ошибки при полировке этих зеркал. Оба телескопа уже приняты астрономами в эксплуатацию и дали первый свет (рис. 9).

Заключение

Создание установки лазерной записи CLWS-300IAE стимулировало исследовательские работы, направленные на разработку новых технологий синтеза дифракционных структур. Изготовление элементов в полярной системе координат оказалось продуктивным. Точность воспроизведения формы волнового фронта дифракционными элементами достигла $\lambda/20 - \lambda/50$, что соответствует наивысшим стандартам классической оптики.

Значительным стимулятором работ стала разработка термохимической технологии изготовления компонентов дифракционной оптики в тонких плёнках хрома. Разработанная технология отличается исключительной простотой и воспроизводимостью, в сочетании с высоким качеством получаемых микроизображений. ■



ПАРАМЕТРЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ДИФФУЗОРОВ

в зависимости от формы апертуры и типа регистрирующей среды

Н. М. Ганжерли, к. ф.-м. н., А. С. Гурин, Д. Д. Крамущенко, И. А. Маурер, Д. Ф. Черных,
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
С. Н. Гуляев, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Рост мультимедийных применений сопровождается интересом к технологиям создания диффузоров, в том числе голографических [1–4]. Диффузоры используются в устройствах формирования светового пучка, в дисплеях и световых экранах, проекционных системах, в системах воспроизведения голографических изображений кругового обзора и т. д. [5, 6]. Это предъявляет определённые требования к таким характеристикам диффузоров, как эффективность пропускания света, технологичность изготовления, высокая устойчивость образцов диффузоров к воздействиям окружающей среды и излучения. Наиболее важными характеристиками диффузоров как оптических элементов являются эффективность пропускания света и форма индикатрисы рассеяния.

■ Цели настоящей работы:

- разработка метода управления параметрами индикатрисы рассеяния голографических диффузоров с помощью методов пространственной фильтрации;
- исследование влияния параметров регистрирующей среды на характеристики голографических диффузоров.

Голографические оптические элементы, к которым относятся и голографические диффузоры, могут быть зарегистрированы на слоях бихромированного желатина и галоидосеребряных фотоэмульсиях. В наших экспериментах регистрация голографических диффузоров осуществлялась на толстослойном самопроявляющемся, содержащем глицерин бихромированном желатине [7] и на отечественных галоидосеребряных фотоэмульсиях ПФГ-01. Использование высоко разрешающих голографических галоидосеребряных эмульсий, обладающих высокой чувствительностью по сравнению с бихромированным желатином, даёт возможность применять в качестве источника излучения доступные гелий-неоновые лазеры и сократить время экспонирования при записи голограмм до секунд и долей секунды. Существующие технологии преобразования первичной амплитудной голографической структуры, зарегистрированной на галоидосеребряных эмульсиях, в рельефно-фазовую позволяют получать глубину поверхностного рельефа порядка 1 мкм и допускают использование полученных рельефных структур в качестве эталонов для промышленного тиражирования голографических диффузоров. Формирование поверхностного рельефа голографической структуры на макроуровне с характерными размерами, превышающими длину волны видимого света, происходит за счёт пространственной модуляции физико-химических параметров желатина на молекулярном уровне в соответствии с регистрируемой на голограмме интерференционной картиной. Нами использованы два основных альтернативных способа реализации модуляции физико-химических параметров желатина:

- Структурирование – образование надмолекулярной структуры посредством избирательного дублирования (сшивания желатиновых молекул) в отбеливателях, содержащих бихроматы (например, отбеливатель R-10) [8]. Образование рельефа в этом случае связано с перераспределением объёмов желатина в фотоэмульсии во время сушки слоя.
- Деструкция – разрыв основных связей в цепях желатиновых молекул под воздействием коротковолнового УФ излучения с длиной волны менее 250 нм (метод ВКУФ) [9]. Рельеф образуется

за счёт травления облучённого желатина в водных растворах.

Одним из основных факторов, определяющих рассеивающие свойства голографических диффузоров, является пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) светочувствительной среды, отражающая зависимость дифракционной эффективности или высоты рельефа голографической структуры от пространственной частоты интерференционной картины. Ранее было показано, что в области пространственных частот $\nu > 150 \text{ мм}^{-1}$ для всех фотоматериалов, подвергающихся влажной обработке с последующей сушкой, наблюдается более или менее быстрый спад ПЧХ [10], причиной которого является действие сил поверхностного натяжения.

Образцы голографических диффузоров были изготовлены как на объёмном БХЖ, так и на фотоматериале ПФГ-01. Использовалась безопорная оптическая схема регистрации голограмм Габора [11].

В ранее представленных работах [12,13] мы использовали апертуру в форме круга, помещаемую в плоскость первичного рассеивателя. Такая апертура ограничивала сверху область пространственных частот, записываемых в плоскости регистрирующей среды. Это позволило в определённых границах ($0,5^\circ - 8^\circ$) управлять шириной индикатрисы рассеяния голографического диффузора $\Delta\theta$ (рис. 1). Верхняя граница этого диапазона определялась влиянием спада ПЧХ фотоматериала в области высоких пространственных частот.

Однако совершенно очевидно, что использование круговой апертуры не является оптимальным с точки зрения таких параметров голографических диффузоров, как форма индикатрисы рассеяния и величина нулевого порядка дифракции, пропускаемым голографическим диффузором. В этом случае более предпочтительным было бы использование апертуры в виде кольца, что позволяет уменьшить вклад низких пространственных частот в регистрируемый голограммой спектр. Высокая чувствительность галоидосеребряных фотоматериалов даже при использовании кольцевых апертур, задерживающих большое количество света, позволяет сохранить время экспонирования голограмм в разумных пределах.

Эксперименты с кольцеобразными апертурами с отношениями внешнего диаметра к внутреннему порядку 1.07 (рис. 1, кривые 1, 2) показали существенное уменьшение интенсивности нулевого порядка I_0 для голографических диффузоров, обработанных по методу ВКУФ по сравнению с диффузорами, полученными от круговой апертуры (рис. 1, кривая 3). Следует также отметить, что индикатрисы рассеяния диффузоров, полученных с использованием кольцевых апертур, имеют более уплощённую вершину в отличие от случая применения круговой апертуры при записи диффузора, когда форма индикатрисы приближается к гауссовой.

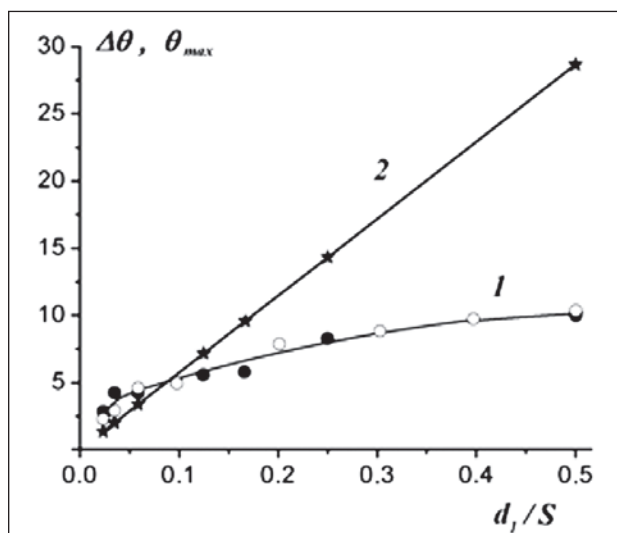


Рис. 1. Зависимость ширины индикатрисы рассеяния голографических диффузоров $\Delta\theta$ (кривая 1) и предельного угла рассеяния θ_{max} (кривая 2) от относительной величины апертуры первичного рассеивателя d_1/S , где d_1 – диаметр апертуры и S – расстояние первоначального рассеивателя до плоскости регистрации.

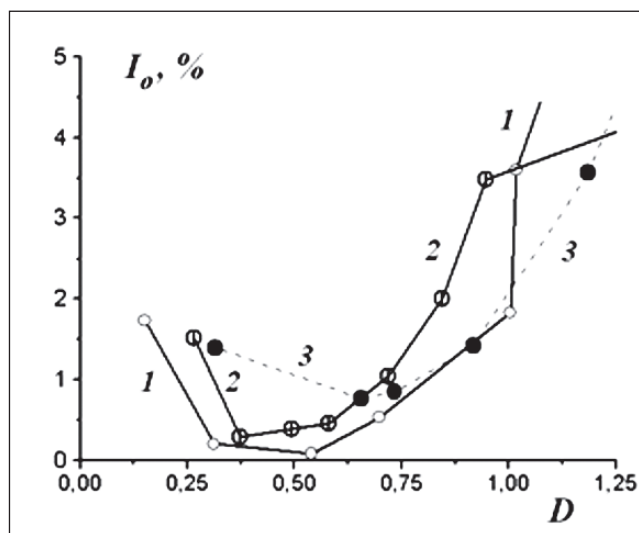


Рис. 2. Зависимости интенсивности нулевого порядка I_0 от средней оптической плотности первичного серебряного изображения D для голографических диффузоров, сделанных с помощью кольцеобразных апертур с различными отношениями внешнего и внутреннего диаметров d_1/d_2 : 1 - $d_1/d_2 = 1,07$; 2 - $d_1/d_2 = 1,06$; 3 - $d_1/d_2 = \infty$

Для лучших образцов голографических диффузоров, полученных с использованием кольцевой апертуры, величина интенсивности света, прошедшего в нулевом порядке дифракции, составила порядка 0,1% от интенсивности падающего света при эффективности пропускания диффузора с учётом френелевских отражений порядка 98%.

Следует отметить, что голографические диффузоры на галоидосеребряных фотоматериалах обладают существенно более высокой эффективностью пропускания света (порядка 98%) по сравнению с диффузорами на самопроявляющихся слоях БХЖ толщиной 100-150 мкм, эффективность пропускания которых составляет примерно 55-61%. ■

Литература

1. Sun Il Kim, Yoon Sun Choi, Yong Nam Ham, Ghong Yun Park, and Jong Man Kim // Appl. Opt. 2003. V. 42. № 14. P. 2482-2491.
2. Tomasz Jannsona, Engin Arikb, Mark Bennahmiasa, Nanda Nathanb, Sam Wangb, Kang Leea, Kevin Yub, and Evgeni Poliakov // Proc. of SPIE. 2006. V. 6225. P. 62251E-1-62251E-19.
3. Ганжерли Н. М., Денисюк Ю. Н., Маурер И. А., Черных Д. Ф. // Журн. технической физики. 2005. Т. 75. № 2. С. 135.
4. Ганжерли Н. М., Гуляев С. Н. // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 9. С. 56.
5. <http://www.poc.com/>
6. <http://www.luminico.com/>
7. Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н. М., Маурер И. А., Писаревская С. А. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 4. С. 62-65.
8. Бруй Е. Б., Корешев С. Н. // Оптика и спектроскопия. 1989. Т. 67. № 3. С. 685.
9. Гуляев С. Н., Ратушный В. П. // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 2. С. 45.
10. Гуляев С.Н. Рельефно-фазовые голограммы на фотоэмульсионных слоях, облученных ультрафиолетовым излучением // Дис. канд. физ.-мат. наук. СПб: СПб ГПУ, 2005.
11. Денисюк Ю. Н., Ганжерли Н. М. // Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 1. С. 65-69.
12. Ганжерли Н. М., Гуляев С. Н., Гурин А. С., Крамущенко Д. Д., Маурер И. А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 7. С. 1-6.
13. Ганжерли Н. М., Гуляев С. Н., Маурер И. А. // Химия высоких энергий. 2008. Т. 42. № 4. С. 1-3.



ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЁМОВ МИКРОЧАСТИЦ И РЕЛЬЕФНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Пен Е. Ф., Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск,
Шаталов И. Г., Новосибирский государственный технический университет

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Восстановление голограммы с помощью приближения Френеля

Общая схема установки для записи внеосевой цифровой голограммы показана на рис. 1.1. Плоская опорная и отражённая от объекта волны интерферируют на поверхности ПЗС камеры. Объект является трёхмерным телом с диффузно отражающей поверхностью, расположенным на расстоянии d от ПЗС.

Дифракция световой волны на голограмме описывается интегралом Френеля-Кирхгоффа:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{j}{\lambda} \iint h(x, y) R(x, y) \frac{\exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda} \rho\right)}{\rho} \times \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta\right) dx dy \quad 1)$$

где $h(x, y)$ – функция голограммы;

$\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}$ – расстояние между точкой в плоскости голограммы и точкой в плоскости восстановления; θ – угол между осью z и прямой, соединяющей точку в плоскости голограммы и точку в плоскости восстановления (рис. 1.2), $R(x, y)$ – функция опорной (восстанавливающей) волны.

Формула 1) является основной для цифрового восстановления голограммы. Поскольку восстановленное

волновое поле является комплексной функцией, то можно вычислить и интенсивность, и фазу. Эта интересная особенность используется в цифровой голографической интерферометрии.

Интеграл Френеля-Кирхгоффа можно упростить:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d\right) \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) h(x, y) \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)\right] dx dy \quad 2)$$

Эта формула называется *приближением Френеля* или *преобразованием Френеля*. Интенсивность равна квадрату амплитуды $I(\xi, \eta) = |\Gamma(\xi, \eta)|^2$, фаза вычисляется выражением $\varphi(\xi, \eta) = \arctan(\text{Im}[\Gamma(\xi, \eta)] / \text{Re}[\Gamma(\xi, \eta)])$. Далее приближение Френеля заменяется дискретным преобразованием Френеля:

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp\left[-i\pi \lambda d \left(\frac{m^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2 \Delta y^2}\right)\right] \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} R(k, l) h(k, l) \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \exp\left[j 2\pi \left(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N}\right)\right] \quad 3)$$

где Δx и Δy – это размеры пикселя цифровой голограммы. Дискретное преобразование Френеля может быть вычислено через Быстрое Преобразование Фурье (БПФ).

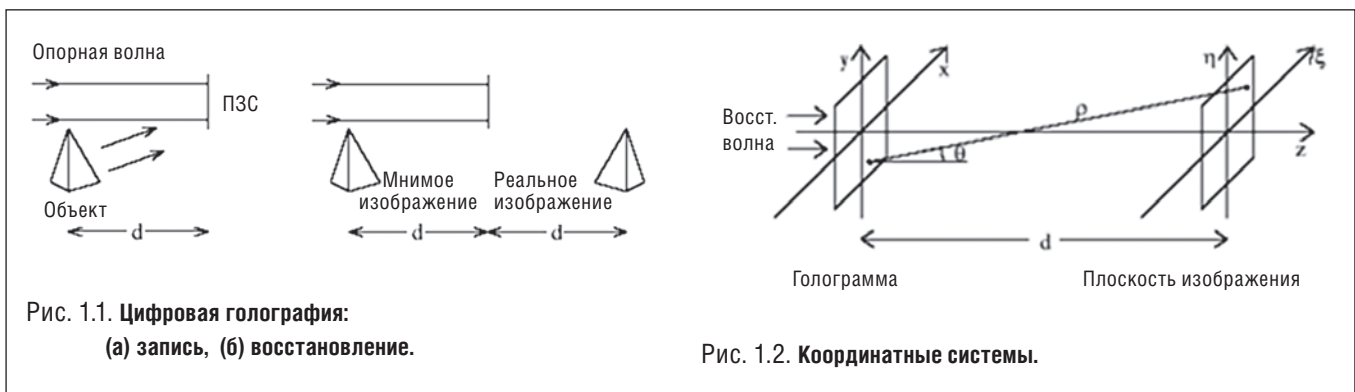


Рис. 1.1. Цифровая голография:
(а) запись, (б) восстановление.

Рис. 1.2. Координатные системы.

1.2. Восстановление голограммы на основе метода свёртки

Прямая цифровая обработка интеграла Френеля-Кирхгоффа занимает много времени. Для цифровой обработки более подходит эквивалентная формулировка, использующая теорему свёртки и называемая здесь *методом свёртки*:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \mathfrak{F}^{-1}\{\mathfrak{F}(h \cdot R) \cdot \mathfrak{F}(g)\}, \quad (4)$$

где \mathfrak{F} – значок прямого преобразования Фурье, \mathfrak{F}^{-1} – значок обратного преобразования Фурье, g – импульсный отклик, который в дискретной форме выглядит как:

$$g(k, l) = \frac{j}{\lambda} \frac{\exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{d^2 + \left(k - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta x^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta y^2}\right]}{\sqrt{d^2 + \left(k - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta x^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta y^2}} \quad (5)$$

Возможно восстановление голограммы методом свёртки. Весь процесс требует три операции преобразования Фурье и эффективно выполняется при использовании алгоритма БПФ.

Метод свёртки может также быть применён для приближения Френеля. Размеры пикселя, восстановленного изображения методом свёртки, равны размеру пикселя голограммы. При восстановлении голограмм методом свёртки количество пикселей на единицу длины получается больше или меньше тех, что получаются при преобразовании Френеля. Метод свёртки выгодно применять для восстановления осевых голограмм от распределений частиц в прозрачном носителе. В этом случае увеличение восстановления должно быть одним для всех расстояний наблюдения с тем, чтобы локализовать частицы или пузыри в объёме объекта.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Исследование объёмов микрочастиц

2.1.1. Модельный эксперимент

Оптическая установка для записи голограммы объёма частиц изображена на рис. 2.1. Объектной волной служит излучение, рассеянное частицами, опорной волной – неискажённое прошедшее излучение. Нами синтезирована цифровая голограмма объёма частиц с помощью интеграла Френеля-Кирхгоффа, вычисленного через теорему свёртки. Применение метода свёртки даёт возможность получить результаты дифракции от частиц, находящихся на одном расстоянии от голограммы. Таким образом, для получения голограммы от объёма частиц при N различных расстояниях частиц от голограммы производится N итераций метода свёртки и суммирование результатов каждой из итераций. Размер объекта 1.024 мм по оси x , 1.024 мм по y и 4 мм по z . Расстояние от передней плоскости объекта до плоскости регистрации голограммы равно 10 мм. Для записи и восстановления голограммы использовалась длина волны 632.8 нм. Размер пикселя голограммы 2 мм × 2 мм. На рис. 2.3 изображена амплитудная голограмма объекта (см. рис. 2.2).

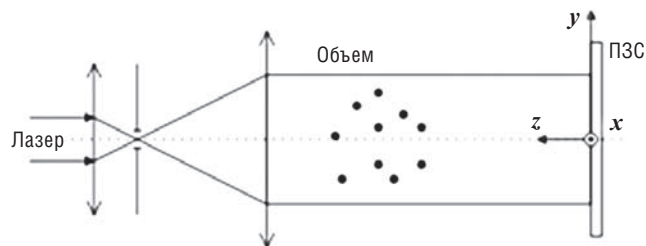


Рис. 2.1. Схема записи цифровой голограммы объёма микрочастиц

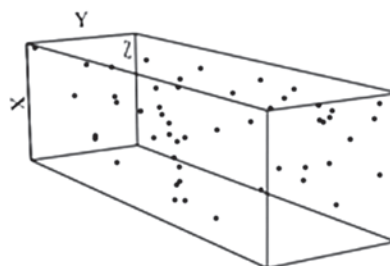


Рис. 2.2. Объём микрочастиц

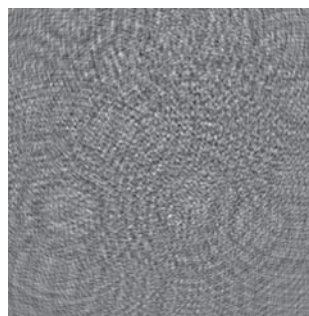


Рис. 2.3. Распределение интенсивности синтезированной голограммы объекта, изображённого на рис. 2.2

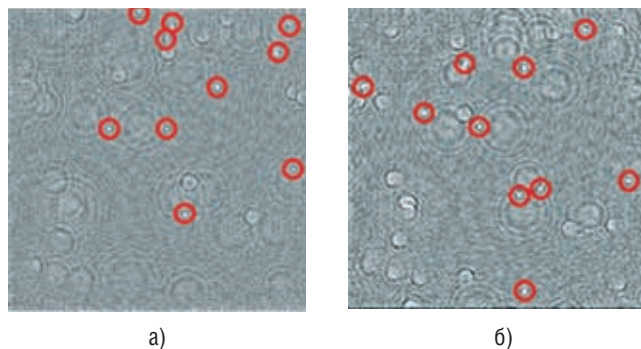


Рис. 2.4. Изображения, полученные восстановлением голограммы, показанной на рис. 2.2, при разных расстояниях до плоскости восстановления: 10 мм – а) и 13 мм – б). Кругами обведены обнаруженные частицы

На рис. 2.4 представлены восстановленные изображения для двух плоскостей, находящихся на разных расстояниях от голограммы. На рисунках заметен фон от частиц, находящихся не в фокусной плоскости, который по интенсивности может быть сопоставим с некоторыми частицами в фокусе, лежащими далеко от оптической оси. В тестовом объекте находилось 50 частиц. Мы использовали 10 восстановлений цифровой голограммы и смогли определить положения всех частиц.

2.1.2. Физический эксперимент

После отработки методики анализа местоположения частиц была проведена серия физических экспериментов. Установка, собранная по схеме рис. 2.1, состоит из полупроводникового красного лазера и CCD камеры (рис. 2.5 а). Камера имеет размеры пикселей 7×7 мкм и разрешение 1024×768 . В качестве исследуемого объекта использовалось стекло с нанесёнными по обеим сторонам песчинками. Одна из полученных голограмм представлена на рис. 2.6 а. Сканирование исследуемого объёма проводилось с шагом 0.1 мм. На рис. 2.6 б—г представлена часть изображений, восстановленных из вышеприведённой голограммы. Отметим, что при физическом эксперименте фон восстановленных изображений имеет гауссово распределение, а качество восстановленных изображений и контраст между частицами и фоном ниже, чем в модельном опыте. Однако, как видно из рисунков, частицы всё же ясно различны. После проведения анализа последовательности восстановленных изображений было получено трёхмерное распределение частиц, представленное на рис. 2.5 б).

2.2. Восстановление рельефа объекта

Для модельного исследования возможностей цифровой голографии в зондировании рельефа объектов был взят тестовый 3D объект в виде карты высот (рис. 2.7 а). Синтез голограммы (рис. 2.7 в) проводился трассировкой лучей при следующих параметрах: размеры объекта по ширине и высоте составляют $2.56 \text{ мм} \times 2.56 \text{ мм}$, расстояние от объекта до голограммы 50 см, длина волны лазера 632.8 нм, разрешение голограммы 512×512 , размер пикселя голограммы $7 \text{ мкм} \times 7 \text{ мкм}$. Эквивалентная оптическая установка показана на рис. 2.7 б. Время расчёта голограммы компьютером Intel Celeron 2.4 GHz составило 3 часа.

Восстановление фазы объектной волны даёт возможность получения рельефа записанного объекта. Амплитудно-фазовая голограмма восстанавливалась при разных параметрах опорной волны (рис. 2.8). В физическом эксперименте для получения амплитудно-фазовой голограммы можно использовать фазово-сдвиговые методы записи. Рельеф объекта (рис. 2.9 б) строился по распределению фазы, изображённого на рис. 2.8 г. ■

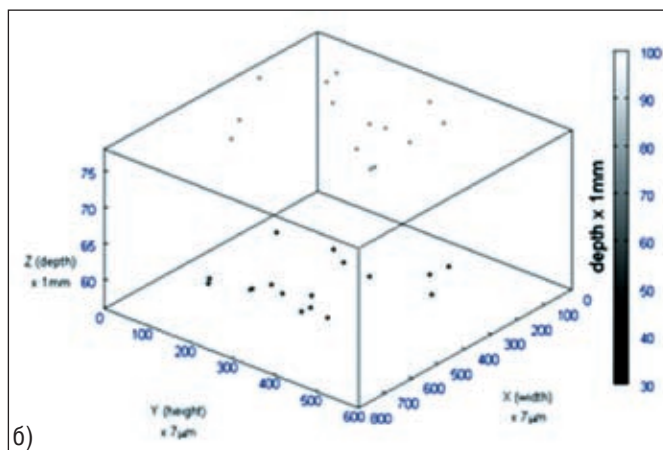
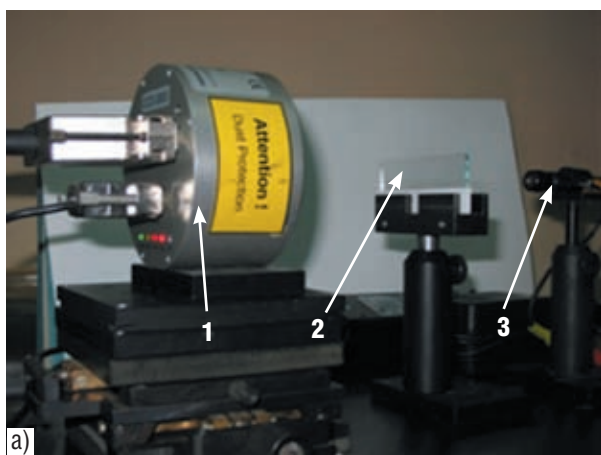


Рис. 2.5. а) Фотография установки, используемой в физическом эксперименте: 1 – CCD камера, 2 – исследуемый объект, 3 – полупроводниковый лазер, б) Распределение частиц, полученное в физическом эксперименте

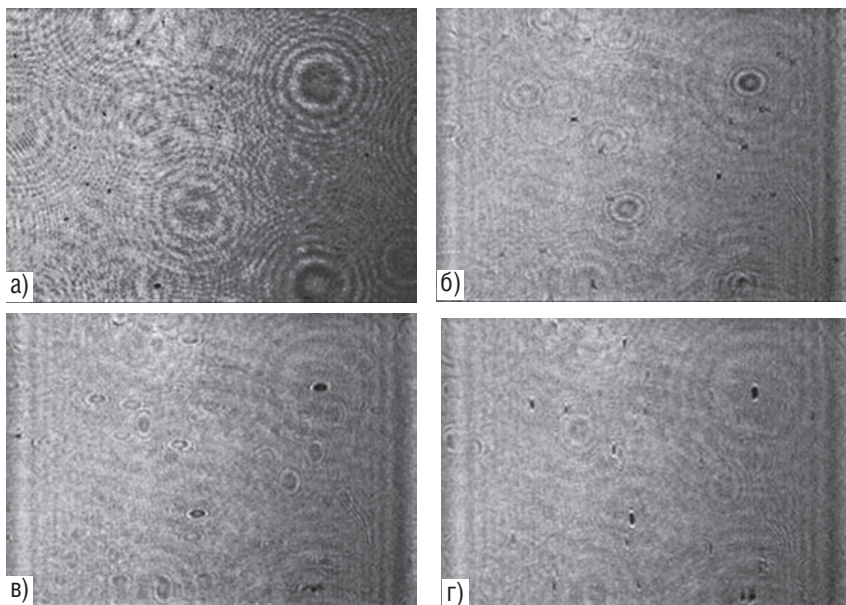


Рис. 2.6. Полученная голограмма а) и изображения, восстановленные из этой голограммы при разных расстояниях до плоскости восстановления, 56 мм – б), 67 мм – в) и 78 мм – г)

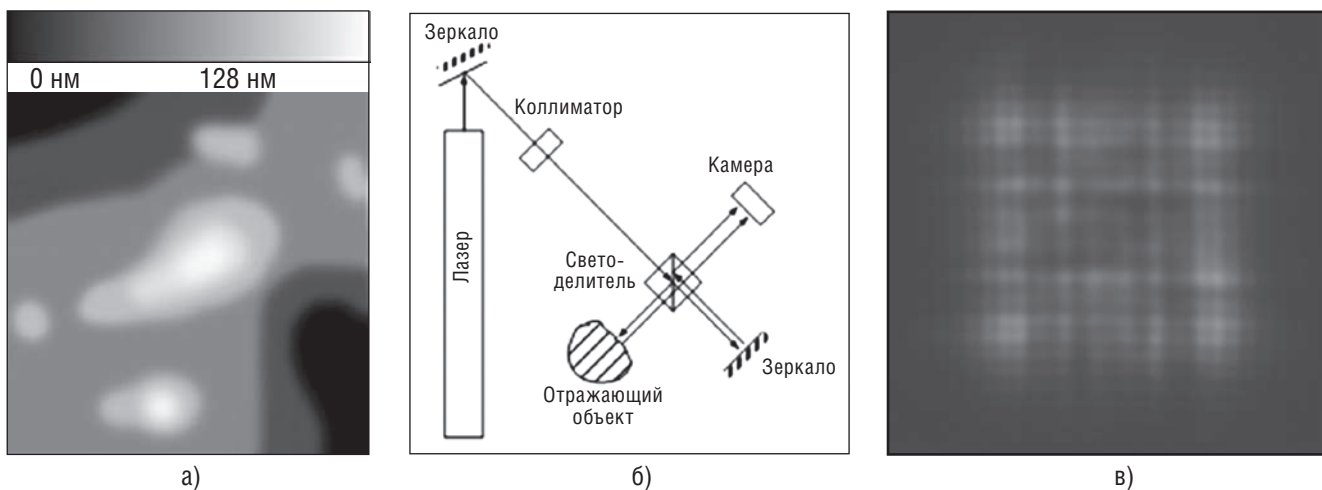


Рис. 2.7. Карта высот исследуемого объекта а), установка, соответствующая модельной записи голограммы б) и синтезированная голограмма объекта в)

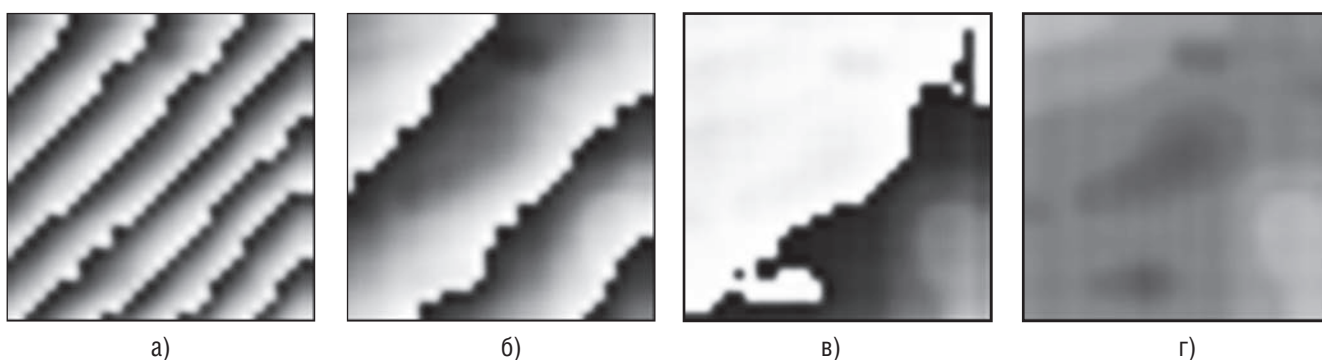


Рис. 2.8. Восстановленная фаза объекта при разных параметрах опорной волны: а) $k_x = cx + 0.0050$, $k_y = cy + 0.0050$; б) $k_x = cx + 0.0020$, $k_y = cy + 0.0020$; в) $k_x = cx + 0.0005$, $k_y = cy + 0.0005$; г) $k_x = cx + 0.0000$, $k_y = cy + 0.0000$; где c_x , c_y – найденные параметры опорной волны

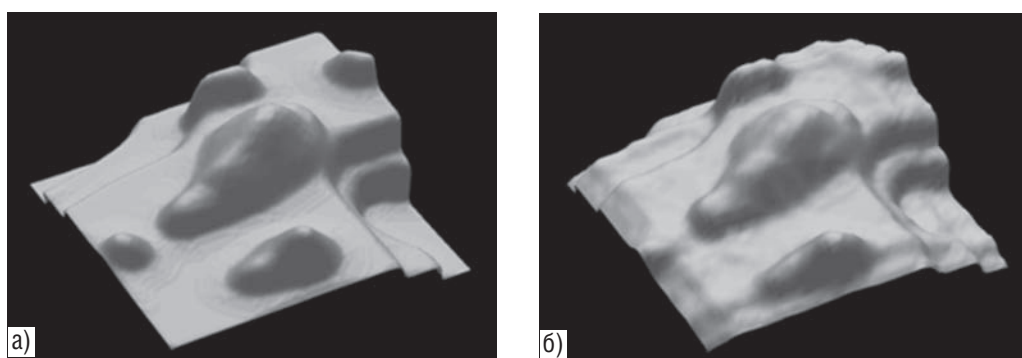


Рис. 2.9. Модель исходного объекта а) и его восстановленное изображение б)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-07-89144.

Литература

1. Гудмен Дж. Введение в Фурье оптику. М.: Мир, 1970.
2. Ярославский Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. М.: Радио и связь, 1987.
3. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1989.
4. Schnars U. and Juptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction, Appl. Opt. 33, 179–181, 1994.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. М.: Техносфера, 2006.



ПОДАВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ

Г. И. Грейсух, Е. Г. Ежов, С. А. Степанов ПГУ архитектуры и строительства, г. Пенза

■ Рельефно-фазовая микроструктура голограмм различного функционального назначения, работающая на отражение в белом свете, осуществляет пространственное разделение дифрагирующих спектральных составляющих. При этом зависимость дифракционной эффективности (ДЭ) от длины волны, т. е. энергетическая спектральная селективность (ЭСС), в ряде случаев может оказаться весьма существенным негативным фактором, приводящим не только к искажению воспринимаемой глазом цветовой гаммы, но и к снижению контраста в наблюдаемом изображении за счёт наложения дифракционных картин, формируемых в нерабочих дифракционных порядках.

Для снижения ЭСС, работающих на пропускание рельефно-фазовых микроструктур и выравнивания в заданном спектральном диапазоне их ДЭ в рабочем порядке дифракции, в работах [1-4] предложено компоновать микроструктуры из нескольких и, в частности, из двух оптических материалов. В последнем случае микроструктуры могут иметь один или два рельефа, как показано на рис. 1. Для того, чтобы любая из представленных на этом рисунке микроструктур работала на отражение, достаточно на обратную по отношению к падающему излучению плоскую поверхность нанести отражающее покрытие и, конечно, пересчитать глубину рельефа и его пространственную частоту.

Формулы для вычисления ДЭ отражательных двухслойных дифракционных микроструктур с пилообразным профилем можно получить, взяв за основу полученное в скалярном приближении выражение, приведённое, например, в работе [5]:

$$\eta_m = \left\{ \frac{\sin[\pi(m + \Delta\varphi/\lambda)]}{\pi(m + \Delta\varphi/\lambda)} \right\}^2, \quad 1)$$

где m – номер порядка дифракции; λ – длина волны падающего на микроструктуру света; $\Delta\varphi$ – приращение оптического пути на одном периоде пилообразного профиля:

$$\Delta\varphi = 2h(n_1 - n_2) \quad 2)$$

для структуры с одним внутренним рельефом (рис. 1а),

$$\Delta\varphi = 2[(n_1 - 1)h_1 - (n_2 - 1)h_2] \quad 3)$$

для структуры с внешним и внутренним рельефами (рис. 1б) и

$$\Delta\varphi = 2[(n_1 - n')h_1 - (n_2 - n')h_2] \quad 4)$$

для структуры с двумя внутренними рельефами (рис. 1с).

Как следует из формулы 1), при стремлении приращения оптического пути к длине волны ($\Delta\varphi \rightarrow \lambda$) ДЭ стремится к единице в минус первом дифракционном порядке ($m=-1$). Поэтому подавление ЭСС будет исследоваться именно в этом рабочем порядке дифракции.

Из формулы 2) для двухслойной рельефно-фазовой микроструктуры с одним внутренним рельефом следует, что характер зависимости приращения оптического пути от длины волны определяется только видом функции $\Delta n(\lambda) = n_1 - n_2$ и, как показано в работах [1, 2], подавление ЭСС в этом случае возможно только при условии, что с ростом длины волны разность показателей преломления двух оптических материалов неуклонно возрастает. Поэтому материалы двух слоёв должны иметь разную величину дисперсии и материал с меньшей дисперсией должен иметь больший показатель преломления. При использовании стёкол это реализуется парой, включающей крон (малая дисперсия) и флинт (большая дисперсия), причём показатель преломления крона должен превышать показатель преломления флинта [6]. Что же касается пластмасс, которые только и целесообразно использовать при массовом копировании голограмм, то их выбор весьма ограничен, и кроноподобные пластмассы [типа акрила или полиметилметакрилата (ПММА)] имеют меньший показатель преломления, чем флинтподобные [типа полистирола или поликарбоната (ПК)]. Для подавления ЭСС, пропускающих рельефно-фазовых дифракционных микроструктур, выполненных из таких материалов, в [4] предложено использовать два рельефа разной глубины. Это решение, как будет показано ниже, эффективно и в случае микроструктур, работающих на отражение.

Обратившись к рис. 1 и формулам 2)–4), нетрудно видеть, что для получения одинаковой ДЭ глубины рельефов h_1 и h_2 отражательной микроструктуры, должны быть в два раза меньше глубин соответствующей микроструктуры, работающей на пропускание. Что же касается пространственного периода микроструктуры, то одина-



Рис. 1. Двухслойные отражательные пилообразные рельефно-фазовые микроstructures с ослабленной спектральной селективностью: а – структура с одним внутренним рельефом; б – структура с внутренним и наружным рельефами; с – структура с двумя внутренними рельефами.

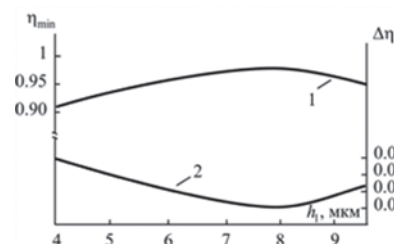


Рис. 2. Зависимости уровня минимальной ДЭ η_{\min} (1) и среднеквадратичного отклонения ДЭ $\Delta\eta$ (2) от глубины внутреннего рельефа h_1 .

ковые углы дифракции обеспечивают пропускающая и отражательная микроstructures, периоды которых тоже отличаются в два раза, причём больший период должна иметь отражательная микроstructure.

В случае, если два материала микроstructures, изображённой на рис. 1в, разделены воздушным промежутком ($n' = 1$), то формулы (3) и (4) совпадают, а, следовательно, при равенстве одинаково обозначенных глубин будут совпадать и ДЭ. В то же время (как легко видеть, сопоставив рис. 1б и 1с), полная глубина рельефа при равных ДЭ у микроstructures с внутренними рельефами больше, чем у микроstructures с наружным рельефом. С ростом полной глубины рельефа усиливается зависимость ДЭ от угла падения излучения на микроstructure, а сама ДЭ может оказаться существенно меньшей, чем прогнозирует скалярное и бесконечно тонкое приближение. Поэтому практическое использование варианта с двумя внутренними рельефами может быть оправдано только ощутимыми технологическими преимуществами, открывающимися при решении конкретной задачи. Учитывая вышеизложенное, исследования зависимости достижимой степени ослабления ЭСС от глубин рельефов проводились для микроstructures, представленной на рис. 1б.

Для определения оптимального значения глубины рельефа h_2 при заданной глубине внутреннего рельефа h_1 необходимо, прежде всего, выбрать функцию, позволяющую достоверно оценивать равномерность ДЭ в пределах выбранного спектрального диапазона. В качестве такой функции можно использовать, например, минимальный уровень ДЭ η_{\min} в пределах выбранного спектрального диапазона или среднеквадратичное отклонение ДЭ от ее максимального значения $\Delta\eta$.

Влияние соотношения глубин рельефов на достижимую степень подавления ЭСС двухрельфной отражательной микроstructures, составленной из пластмасс двух типов, продемонстрируем на примере микроstructures с нижним слоем (см. рис. 1б), выполненным из ПММА, и верхним слоем – из ПК. Исследования проводились в видимом спектральном диапазоне от 0.4 до 0.7 мкм. Графики изменения уровня минимальной ДЭ η_{\min} и среднеквадратичного отклонения ДЭ $\Delta\eta$ в зависимости от глубины внутреннего рельефа h_1 , представ-

лены на рис. 2. Кривые строились при глубинах h_2 , найденных из условия достижения максимально высокого уровня η_{\min} для каждого из значений глубины h_1 . У исследуемой микроstructures найденные глубины $h_2 < h_1$ для всех значений h_1 и, следовательно, полная глубина рельефа микроstructures, как видно из рис. 1б, определяется глубиной внутреннего рельефа.

Экстремумы кривых, представленных на рис. 2, приходятся, как и следовало ожидать, на одно и то же значение глубины внутреннего рельефа: $h_1^{(opt)} = 7.98$ мкм при $h_2 = 6.19$ мкм. В этой точке уровень η_{\min} максимально приближен к единице и равен 0.98, что говорит о практически полном подавлении ЭСС.

В заключение отметим, что все основные положения применимы и к бинарным дифракционным микроstructures, естественно, с поправкой на то, что у таких структур при стремлении приращения оптического пути к половине длины волны ДЭ +1 и -1 дифракционных порядках достигает лишь 0.405. Подавление же ЭСС обеспечит совпадение распределений энергий по дифракционным порядкам на всех длинах волн выбранного спектрального диапазона. ■

Литература

1. Лукин А. В., Мустафин К. С., Рафиков Р. А. Голограммный оптический элемент // Патент РФ № 1271240. Оpub. 10.05.1996.
2. Лукин А. В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. Том 74, № 1. С. 80-87.
3. Ebstein S. T. Achromatic diffractive optical elements // Proceedings SPIE. 1995. Vol. 2404. P. 211-216.
4. Takehiko Nakai. Diffractive optical element and optical system having the same // Patent No. US 20010038503A1. Pub. Date: Nov. 8, 2001.
5. Бобров С. Т., Грейсух Г. И., Туркевич Ю. Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986.
6. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Степанов С. А. Выбор материалов для «ахроматизации» рельефно-фазовых дифракционных структур // Компьютерная оптика – 2008. Том 32, № 1. С. 43-46.



НЕЛИНЕЙНАЯ ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА

ДИФРАКЦИОННЫХ КАРТИН

Н. Г. Власов, С. М. Кулиш,
МГТУ «Станкин», Москва

■ Определение размеров микрообъекта по его дифракционной картине в дальней зоне Фраунгофера характерно тем, что по функции пространственного распределения интенсивности $I(x)$ в этой картине необходимо сначала найти ее аргумент $x = \alpha \xi$, где ξ – пространственная координата. Затем находится коэффициент α , в который входит искомый размер h микрообъекта. Так, например, для кругового микроотверстия $\alpha = \frac{\pi R}{\lambda L}$, где R – диаметр кругового микроотверстия, L – расстояние от освещенного объекта до плоскости регистрации интенсивности, λ – длина волны освещающего излучения.

Для цифровой обработки результатов эксперимента регистрацию пространственного распределения интенсивности удобно производить на ПЗС-матрицу, выполняющую в данном случае функцию регистрирующей среды. В нашем случае, как и в голографии, размеры регистрирующей среды играют роль апертуры в обычной оптической системе.

Иногда в связи с ограниченностью апертуры, например, размеров ПЗС-матрицы, регистрируется только центральная часть дифракционной картины, вблизи нулевого значения аргумента. Тогда ошибка Δh в определении размеров микрообъекта велика, так как $\Delta h \approx \frac{1}{I'(x)} \Delta I(x)$,

а для микрообъектов простой формы, таких как щель, нить, прямоугольник, производная вблизи нулевого значения аргумента близка к нулю.

В настоящей работе предлагается такое нелинейное преобразование $I(x)$, при котором в преобразованной функции появляются дополнительные минимумы, по которым и определяется искомый размер микрообъекта. Прототипом является предложенный в [1] нелинейный алгоритм обработки интерферограмм, позволяющий поднять чувствительность измерений вплоть до предельной. Он заключается в следующем.

Введём в компьютер три распределения интенсивности: $I(x,y)$, $I_1(x,y)$, $I_2(x,y)$, где $I(x,y)$ соответствует интерферограмме, полученной при настройке интерферометра на полосу бесконечной ширины, $I_1(x,y)$ и $I_2(x,y)$ – интенсивности объектного и опорного волновых полей по отдельности. Для каждой точки (пикселя) плоскости (x, y) вычислим

$$\cos \varphi(x, y) = \frac{I(x, y) - I_1(x, y) - I_2(x, y)}{2\sqrt{I_1(x, y)}\sqrt{I_2(x, y)}}, \quad 1)$$

где $I(x,y)$, как обычно, равно:

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)}\sqrt{I_2(x, y)} \cos \varphi(x, y) \quad 2)$$

Возводя выражение 1) в квадрат и умножая на два, получим, в соответствии с формулами тригонометрии:

$$2 \cos^2 \varphi(x, y) = 1 + \cos 2\varphi(x, y) \quad 3)$$

Вычитая единицу из выражения (3), возведём полученную разность в квадрат, и умножая на два, получим на дисплее распределение интенсивности, соответствующее $\cos 4\varphi(x, y)$, и т. д.

Отметим, что функции синус и косинус удобны тем, что воздействуя определённым образом на эти функции, можно линейно изменять их аргументы, что и позволяет повысить чувствительность интерференционных измерений. Поскольку в основе эффекта дифракции лежит интерференция, представляется целесообразным рассмотреть возможность адаптации названного алгоритма к обработке дифракционных картин с целью повышения точности определения размеров соответствующих им микрообъектов. Такой подход оправдан тем, что для перечисленных объектов простой формы дифракционная картина вблизи нулевого значения аргумента описывается функцией, близкой к косинусу. Покажем это на примере кругового микроотверстия, для которого поле в картине дифракции в дальней зоне описывается функцией Бесселя первого порядка $\frac{2J_1(x)}{x}$.

Раскладывая удвоенную функцию Бесселя первого порядка в степенной ряд и деля его на x , получим, что первые члены нового ряда, определяющие его поведение вблизи нуля, действительно близки к ряду, соответствующему косинусу.

Итак, на примере дифракционной картины на круговом микроотверстии, последовательно получим:

$$I(x) = \left(\frac{2J_1(x)}{x} \right)^2, \quad 4) \quad \text{и} \quad I_1(x) = 2I(x) - 1, \quad 5)$$

$$I_2(x) = 2I_1^2(x) - 1, \quad 6)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$I_n(x) = 2I_{n-1}^2(x) - 1. \quad 7)$$

Несколько значений первоначальной функции $I(x)$ и её аргумента x , при котором $I_n(x)$ достигает первого нуля, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Первые нули функций $I_n(x)$ и соответствующие им значения $I(x)$ и x .

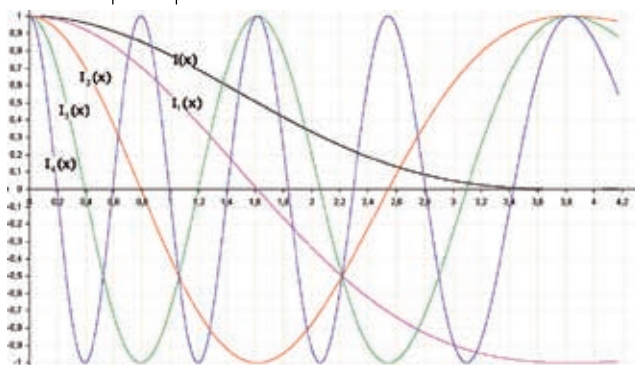
n	0	1	2	3	4	5
$I(x)$	0	0,5000	0,8535	0,9619	0,9904	0,9976
x	3,8317	1,6163	0,7906	0,3933	0,1963	0,0982

Из таблицы видно, что вблизи нулевых значений аргумента нули $I_n(x)$ с хорошей точностью становятся периодичными, что говорит о близости функции $I_n(x)$ к косинусу. На графике в интервале $|x| \leq 4$ для сравнения приведены функция $I(x) = \left(\frac{2J_1(x)}{x}\right)^2$ и несколько функций $I_n(x)$.

Значение первого нуля одной из функций $I_n(x)$, находящегося вблизи края ПЗС-матрицы, достаточно для определения радиуса кругового микроотверстия R . Зная ξ и L из эксперимента, найдем

$$\frac{\pi R \xi_n}{\lambda L} = x_n, \quad R = x_n \frac{\lambda L}{\pi \xi_n} \quad (8)$$

В отличие от значений исходной функции $I(x)$ вблизи нулевого значения аргумента, нули $I_n(x)$ при тех же его значениях определяются надёжно и с хорошей точностью, т. к. $|I_n(x)| = 1$ и $\Delta x \approx \Delta y$.



Обсудим теперь полученные результаты с несколько неожиданной точки зрения. Если известно априори, что регистрируемая интенсивность дифракционной картины находится внутри нулевого порядка дифракции, то известна и фаза волнового поля, равная в этой области нулю. Извлекая квадратный корень из $I(x)$, найдём и амплитуду. Объектное волновое поле в плоскости предмета и в области дифракции Фраунгофера связаны преобразованием Фурье. Таким образом, численно выполняя преобразование Фурье, в принципе можно получить «восстановленное» изображение. Однако вблизи нулевого значения аргумента записываемое волновое поле имеет вид

$$\frac{2J_1(x)}{x} \approx \text{const}, \text{ ограниченной по радиусу функцией}$$

типа ступеньки размерами регистрирующей среды, в данном случае — ПЗС-матрицы. Напомним, что в задачах записи и восстановления волнового поля голографическими методами края регистрирующей среды играют роль краёв диафрагмы обычной оптической системы. Поэтому преобразование Фурье от неё снова даёт функцию типа $\frac{2J_1(x)}{x}$, нули и максимумы которой характеризуют размеры диафрагмы, а не исследуемого объекта. Если же взять преобразование Фурье от одной из функций $I_n(x)$, минимумы которой находятся вблизи краёв апертуры, и ограничить область преобразования Фурье этими минимумами, то произойдёт своеобразная косинусная аподизация апертуры, рассмотренная в [2].

Поясним изложенную ситуацию на примере оптического аналога рассмотренной ситуации, следуя [3].

Пусть сначала действующий диаметр апертуры вырезает только центральную часть диска Эйри в картине дифракции на круговом микроотверстии. На края апертурной диафрагмы попадёт тогда довольно яркая часть диска Эйри, и вокруг центрального максимума в изображении кругового микроотверстия наблюдаются яркие пространственные флуктуации интенсивности. По мере увеличения диаметра диафрагмы интенсивность излучения, попадающего на её края, уменьшается и становится равной нулю, когда края апертуры совпадают с первым минимумом дифракционной картины, то есть с серединой первого тёмного кольца. В этот момент интенсивность вторичных максимумов на краях изображения кругового микроотверстия становится минимальной, они практически тонут в шумах и визуально не наблюдаются. При дальнейшем увеличении апертурной диафрагмы на её края попадают последовательно значительно менее интенсивные вторичные максимумы и минимумы дифракционной картины и флуктуации интенсивности, соответственно ослабленные, снова появляются на краях изображения. Формирование изображения практически заканчивается при попадании в апертуру третьего дифракционного максимума [4], так как интенсивность более высокого порядка незначительна и не вносит заметного вклада в образование изображения. Края апертуры оказываются практически неосвещёнными, и флуктуации на краях изображения пропадают.

В нашем же случае изображение получается в результате цифровой обработки дифракционной картины, рассматриваемой как голограмма, амплитудное пропускание которой подвергается преобразованию Фурье. Если область интегрирования ограничена минимумом одной из функций $I_n(x)$, то тогда восстановленное изображение кругового микроотверстия будет описываться колоколообразной функцией, вторичные максимумы которой значительно подавлены, а первые минимумы позволяют однозначно определять размеры объекта.

Таким образом, по интенсивности дифракционной картины, зарегистрированной внутри нулевого порядка дифракции, предложенный метод позволяет обойти фазовую проблему и получить своеобразное «сверхразрешение» при определении размеров простых микрообъектов. ■

Литература

1. Власов Н. Г., Кулиш С. М. Нелинейная обработка интерферограмм. Нелинейный мир. 2007. № 9. Т. 5. С. 620-621.
2. Власов Н. Г., Кинбер Б. С., Семенов Э. Г. Аподизация оптических элементов. Компьютерная оптика. 1989. № 5. С. 29-31.
3. Власов Н. Г., Мухтаров Ш. Д. Самоаподизация в изображениях микрообъектов, совпадающих по форме с апертурой. Прикладная математика и техническая физика, 1999. № 3. С. 29-31.
4. Ewanov C. R., Sorubay C., Opt. Engineer. 1984. 23. № 5. P. 620-625.



■ SMPTE Motion Imaging Journal

Ноябрь / Декабрь 2007

Статья принята к публикации в апреле 2007 года. Copyright © 2007 SMPTE

Новая революционная технология:

стереоскопическое КИНО

Ленни ЛИПТОН |

Февраль 2007 года стал переломным моментом в истории кинематографа. Сначала вышла статья на целую полосу в журнале Variety, в которой превозносились достоинства фильмов в формате 3D*, а несколько дней спустя в передовице L.A. Times прозвучала мысль о том, что студиям следует обратить внимание на возможность использования формата 3D. С этого времени авторы многих статей, появляющихся в отраслевых изданиях, одобрительно отзываются о стереоскопическом кино. Данная технология является чрезвычайно многообещающей для киноиндустрии, не знавшей всплесков на протяжении целого столетия, в основном, благодаря тому, что кассовый сбор от последних фильмов, снятых в формате 3D, в три раза превосходит сбор от тех же фильмов, одновременно выпущенных в прокат в 2D-формате**: «Цыпленок Цыпа» (Chicken Little), «Дом-монстр» (Monster House) и «В гости к Робинсонам» (Meet the Robinsons).

Кроме того, был переведён в 3D-формат анимационный фильм «Кошмар перед Рождеством» (The Nightmare Before Christmas), снятый 14 лет назад на студии «Дисней» для домашнего просмотра, после чего он снова вышел на экран и имел успех. До февраля 2007 года в статьях, публикуемых в отраслевых и массовых печатных изданиях, стереоскопическое кино служило объектом для насмешек; время показало ошибочность такого отношения. Теперь дело обстоит иначе. Что изменилось, кроме увеличения кассовых сборов? В настоящей статье мы попытаемся представить процесс появления новых технологий в кинематографе в его исторической перспективе и определить причины, которые обусловили подобное изменение отношения к стереоскопическому кино.

Вопрос о влиянии технического прогресса на производственные и творческие аспекты кинематографа является достаточно обширным, в данном случае мы можем представить лишь поверхностный обзор темы (Таблица 1). В настоящей статье освещается переход от плоского изображения в кинематографе к стереоскопическому. Я занимался

* формат 3D означает стереоскопическое изображение. Следует иметь в виду, что в настоящее время термин 3D используется также для обозначения трёхмерной компьютерной графики в плоскостном изображении. – Ред.)

** формат 2D означает обычное плоскостное изображение. – Ред.)

Об авторе



Ленни Липтон, отец электронных стереоскопических дисплеев, получил в своей отрасли более 30 патентов. Ему присуждена награда Smithsonian за изобретение CrystalEyes, который представляет собой настольный стереоскопический дисплей уже на протяжении 20 лет. Он изобрел Zscreen, являющийся основой для кинематографических систем Real D, установленных в более чем 14 странах. В настоящее время Л. Липтон является Главным техническим руководителем Real D. Он – автор четырёх книг, включая Independent Filmmaking и Foundations of the Stereoscopic Cinema. Он – автор текста песни «Puff the Magic Dragon», которая проиллюстрирована и является наиболее продаваемой детской книгой в США. Л. Липтон был посланником в рамках программы культурных связей Государственного департамента США. Его кинематографические работы демонстрировались в музеях Tate Liverpool Museum и Whitney Museum of American Art, а также находятся в киноархиве Pacific Film Archive при Калифорнийском университете.

Л. Липтон проживает с семьёй в Лос-Анджелесе.

разработкой систем стереоскопического изображения более 30 лет и 5 лет назад написал статью, которая вышла в SMPTE Journal под названием «Стереоскопическое кино: от фильма к цифровому изображению». В ней подробно описана система, которая в настоящее время внедряется повсеместно, а также процесс проецирования с использованием

электрооптического модулятора ZScreen. Для того чтобы соответствовать высоким стандартам кинематографа, прибор необходимо было усовершенствовать. Он практически ничем не отличался от модулятора, который более 15 лет поставляла компания StereoGraphics (предшественник Real D) для создания эффекта виртуальной реальности.

Кинематограф постоянно претерпевает эволюцию. Телевидение вышло из кинематографа и по мере становления стало фундаментом для развития цифрового кино – любопытный факт: круг замкнулся там, где и начался. На заре кинематографа усилия изобретателей были сосредоточены на звуке, цвете, широком экране и трёхмерном изображении, и только по прошествии десятилетия усилия принесли свои плоды и оказались экономически целесообразными. Первые опыты Эдисона были направлены на создание звукового фильма, для этой цели предпринимались попытки по синхронизации звука с использованием прибора, по форме напоминающего цилиндр. После прекращения сотрудничества с Эдисоном его помощник по имени Уильям Кеннеди Лори Диксон создал кинетофонограф.

В первых фильмах кадры раскрашивались с помощью шаблонов или тонировались вручную. Прошло немало времени, прежде чем был создан первый цветной кинофильм. Следует отметить, что многие специалисты, занимавшиеся цветом, работали и с технологией стереоскопического кино. Это родственная проблема, поскольку несколько каналов информации должны комбинироваться мозгом человека для получения желаемого физического ощущения.

На раннем этапе братья Люмьер экспериментировали с широким экраном и фильмами сверхбольшого формата, а система Fox Grandeur в 1930-х годах является примером широкоэкранного процесса, которая была внедрена в течение короткого времени. Далее авторы изобретения экспериментировали с такими усовершенствованиями, которые в данный момент являются общепринятыми понятиями, но технологией, которой суждено было стать революционной, явилось стереоскопическое кино.

Проведу параллели между нынешним внедрением стереоскопического кино и более ранними этапами перехода на более совершенные технологии.

Звук

Существует поразительная схожесть между внедрением звука и внедрением стереоскопического кино. И в том и в другом случаях потребовались десятилетия технологического развития там, где изначально требовались установки для синхронизации звука и изображения. И в том и в другом случае потребовались инвестиции на уровне киностудии и кинотеатра. В обо-

их случаях использовались схожие бизнес-модели. Оба новшества были внедрены как на киностудиях, так и при кинопоказе. Оба послужили причиной повышения цен на билеты, и оба потребовали пересмотра технических и творческих приёмов фильмопроизводства, таких как технологическое проектирование, киносъёмка, вопросы производственной цепочки и стиля актёрской игры.

Звуковое кино возникло благодаря многолетним усилиям многих изобретателей и лишь после этого получило коммерческое признание. В конечном счёте решающее влияние на его практическое применение оказало сочетание лампового усилителя и технологий озвучивания фильма. Один из первых звуковых полнометражных фильмов «Певец Джаза» был снят с помощью системы Warner Bros. Vitaphone (рис. 1) с использованием фонографа, механически соединённого с проектором. В фильме имеется около двух минут импровизированных диалогов и несколько синхронизированных песен. Часто отдают должное роли этого фильма в популяризации звукового кино. Его диалоги явились откровением для зрителей и изменили их представление о возможностях этого выразительного средства.

Таблица 1. Основные технологические преобразования в постановочном кино.

Иллюстрированная таблица составлена Дэвидом Кунцем и Рэем Зоуном

Технология	Год внедрения	Практическое влияние внедрения	Художественное влияние
Немое кино	1895	Потребовалось создание новой инфраструктуры для кинопоказа	Появилось новое восприятие художественного повествования
Звук	1927	Усложнилось производство фильма и его стоимость и увеличилась стоимость билетов	Акцент от повествования переместился к диалогу
Цвет	1935	Увеличена стоимость производства фильма, без увеличения стоимости кинопоказа	Увеличился диапазон выразительных средств
Широкий экран	1952	Увеличены стоимость производства фильма и стоимость кинопоказа	Усилился эффект присутствия при просмотре фильма
3D	1952	Появились дополнительные сложности и ограничения на этапе производства и при кинопоказе	Существенного изменения влияния на содержание фильма и на его восприятие не произошло
Цифровая проекция	2000	Потребовались инвестиции, но была обеспечена повышенная надёжность и простота в сравнении с плёночной проекцией	Художественное восприятие кинозрителя не изменилось
Цифровая 3D-проекция	2005	Потребовались инвестиции, но была обеспечена повышенная надёжность без необходимости переобучения оператора	Усилен эффект присутствия при просмотре и расширена эмоциональная гамма восприятия

История кинематографа является одним из очевидных технологических прорывов при непрерывном развитии инженерных разработок, которые зачастую являются основанием для увеличения цен на билеты.

Когда звуковые фильмы вышли в прокат, цены на билеты увеличились, поскольку кинотеатрам пришлось вложить средства в звуковое оборудование. В то время в собственности студий находилось много кинотеатров, что обуславливало связь с интересами предпринимательства. По информации различных источников, стоимость установки звукового оборудования составляла от \$10 000 до \$20 000, что в конце 1920-х годов представляло собой огромную сумму. В своей книге «Скорость звука»[2] Скотт Эйман пишет: «Чтобы сделать инвестиции более привлекательными, Warners и ERPI (Electrical Research Product Inc. – новая дочерняя компания Western Electric) предложили профинансировать капиталовложения, если кинотеатр уменьшит расходы на 25% с выплатой оставшейся части в течение следующего года и установлением еженедельного сбора в 10 центов с каждого места».

После появления звука часть того, что считалось основными положениями немое кино, следовало пересмотреть. Проведение подобной переоценки стало типичным при внедрении новшеств в кинематографе. Изначально существовало недопонимание между артистами, съёмочной группой, маркетинговой группой и прокатчиками, которым также необходимо было научиться пользоваться новшествами. Передать нужную атмосферу фильма и внедрять каждое технологическое усовершенствование – это задача актёров, съёмочной группы и технических работников. Немое кино включало в себя

пантомиму, монтаж и прочтение – прочтение титров. Все они образовали свой собственный мир стилизованных выразительных средств, столь же стилизованный, как японский театр Ноо.

Сначала представителям киноиндустрии казалось, что новую технологию следует использовать для звуковых эффектов и музыкальных фонограмм, поскольку немое кино никогда не было полностью немым, а демонстрировалось под живой музыкальный аккомпанемент. С позиций сегодняшнего дня в это верится с трудом, но изначально съёмочные группы не понимали, что такое выразительное средство, как звук, следовало использовать при съёмке имевшихся в киносценарии диалогов. Босли Кроутер в своей книге «Львиная доля»[3] приписывает эту догадку Ирвингу Тальбергу из Metro-Goldwyn-Mayer (MGM). Как бы то ни было, далеко не сразу удалось синхронизировать звук с движением губ на экране. Потребовалось время, прежде чем кино вернулось к монтажу, поскольку необходимость диалога в кинематографе оттянула на себя часть возможностей тогдашнего оборудования и, прежде всего, ограничило движение камеры. Кино на мгновение вернулось к композиции портальной арки начала эпохи немое кино, продолжительность съёмки фильма увеличилась. В течение лишь нескольких лет – с 1927 по 1930 годы – произошли потрясающие перемены. Первые, довольно «сырые» звуковые фильмы ныне представляют интерес лишь для историков кинематографа, но фильмы начала 1930-х годов остаются

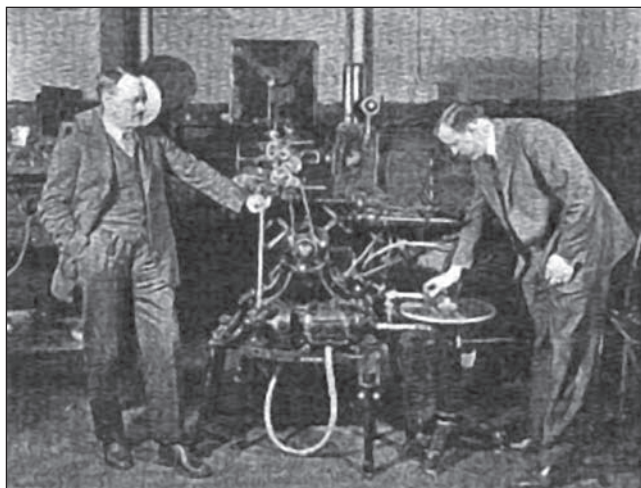
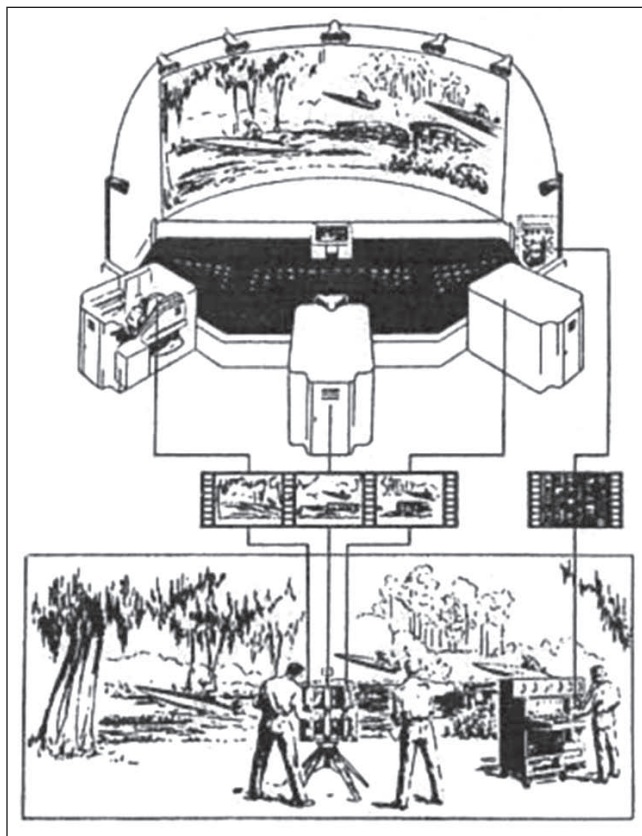


Рис. 1. Система Vitaphone.

Внедрённая в 1927 году, система использовала фонограф, синхронизированный с кинопроектором. Снимок носит скорее рекламный характер, так как киномеханики не часто носили костюмы-тройки

Рис. 2. Классическая Cinerama.

На этом рисунке изображена схема процесса от киносъёмочных камер к вогнутому экрану. Для демонстрации фильма требовались три киномеханика, звукооператор и техник



доступными для восприятия современной аудитории благодаря высокому уровню их творческой и технической составляющих.

Кинотеатральная публика и инвесторы

Перед началом Второй мировой войны доходы кинобизнеса увеличились в связи с ростом числа зрителей, однако после окончания войны, в особенности в 1948 году, количество зрителей резко сократилось, что объясняли соглашением, согласно которому студии теряли права собственности на кинотеатры, а также снижением чистого дохода наряду с появившимися после войны новыми возможностями для развлечений, появлением телевидения. Несмотря на сокращение числа зрителей, начавшееся в 1948 году, доходы кинотеатров в большей или меньшей степени росли в связи с удорожанием цен на билеты. Это увеличение цен связывали с инфляцией, сопутствующими развлечениями и внедрением новых технологий.

Каково влияние технологических новшеств в области кинематографа на пайщиков? Если мы рассмотрим появление звука, оно сопровождалось высокими рисками для части студий и кинотеатров, поскольку требовало солидных капиталовложений. Кинотеатрам пришлось потратиться на устройства воспроизведения звука, а студиям – на строительство павильонов звукозаписи. Им пришлось закупить новое оборудование и создать новую производственную цепочку, чтобы снимать звуковые фильмы. Цены на билеты были повышены, чтобы покрыть расходы.

Киноиндустрии изначально были необходимы технические усовершенствования (наряду с популярностью звёзд, производством блокбастеров и удлинёнными вдвое сеансами), чтобы интерес зрителей к кинофильмам не угас. В начале 1950-х годов некоторые технологии были проверены на зрителях. Одним из подходов было изменение формы и размеров экрана, а другим – попытка внедрить трёхмерные фильмы.

Синемаскоп и широкий экран

В начале 90-х годов прошлого столетия между собой конкурировали технологии проекции широкого формата (на 70-мм плёнке – ред.), широкого экрана и формата 3D с двумя проекторами. К примеру, Cinergama использовала три проектора для проецирования изображения на 150° вогнутый экран, а также установку для воспроизведения стереофонического звука (Рис. 2). Система 3D с двумя проекторами, ранее используемыми для перехода с поста на пост, перенастраивалась: один проектор проецировал изображение для правого, другой – для левого глаза. В начале 1950 годов было снято около 50 фильмов, но многие так никогда и не были показаны в 3D-формате в связи со сложностями при проецировании изображения. Синхронизировать два проектора было очень сложно.

В 1950-х годах лидирующее положение занял синемаскоп, поскольку его фильмы можно было проецировать

путём замены оптики в проекторе и использованием большей ширины экрана, а не путём увеличения числа проекторов, как у Cinergama или при показе двухпроекторного 3D.

Сразу после появления синемаскопа плавное развитие кинематографии затормозилось. Упростился монтаж. На короткий период динамика кинематографа была забыта, затем съёмочные группы приспособились к широкому формату кадра. С появлением синемаскопа стоимость производства фильма и изготовления копий увеличилась за счёт использования на начальном этапе магнитных дорожек на фильмокопиях. Кроме того, в кинотеатрах пришлось установить новые экраны, закупить новую оптику и новую стереофоническую систему. Зрителям пришлось платить за билеты дороже, так как все фильмы синемаскопа и многие фильмы, снятые по этой системе, диктовали свои цены на премьерные показы. Очки для просмотра 3D-фильмов обходились примерно в 10 центов, и эта сумма добавлялась к цене билета на фильмы, утренние показы которых в то время стоили 25 центов.

Сегодня все фильмы снимают с более широким соотношением сторон кадра. Формат кадра Эдисона 1,33:1 более не существует (за исключением аналогового телевидения и IMAX). Фильмы, как в формате 1,85:1, так и в формате 2,4:1, демонстрируются в кинотеатрах на широком экране, и практически все фильмы сняты в цвете и со звуком. Когда новая технология успешно освоена, назад пути нет. Сбудется ли это с приходом стереоскопического кино?

Цвет

Цвет имел долгий период развития и интересную историю. Чтобы утвердиться, цвету понадобилось долгое время, и сегодня чёрно-белые фильмы являются исключением. Чтобы только поверхностно коснуться вопроса, следует сказать, что на раннем этапе существовали двухцветные системы, использовавшие проекторы с несколькими объективами, и двусторонние копии, где два фрагмента фильма накладывались друг на друга, но эти решения в дальнейшем не прижились. Необходимо было решить двойную задачу: как снимать изображение с хорошим качеством и полноценным цветом и как изготавливать относительно недорогие и качественные фильмокопии для проката.

Для студий цвет потребовал серьёзных капиталовложений, в особенности с фактической монополизацией этой технологии на ближайшие три десятилетия компанией Technicolor. Кстати, подбирая материалы для этой статьи, я выяснил, что в некоторое время в 1920-х годах бренд Technicolor имел уничижительное значение. Это был не «славный Technicolor», а «ну, этот паршивый цвет». Удивительно, как разительно изменились способ восприятия цвета как средства выражения и само восприятие слова Technicolor. Возможно, этот факт будет схож с теперешним изменением отношения к стереоскопическому цифровому кино.

Цвет интересен тем, что кинотеатры получили возможность использовать те же проекторы и экраны, которые уже использовались ранее, без увеличения расходов. Но студиям и прокатным компаниям пришлось вложить большие средства в съёмку и тиражирование цветных кинофильмов. Зачастую на раннем этапе появления цветного кино приходилось устанавливать надбавку к цене билета на цветной фильм. Что интересно, сегодня расходы на съёмки цветного фильма и чёрно-белого стали абсолютно одинаковыми.

Два аппарата в одном корпусе.

Хотя такое сравнение не совсем корректно, примеры, подобные внедрению теперешней технологии кинематографа и стереоскопического кино, можно было найти ранее. Изначально в проекционном корпусе было более одного аппарата. Например, первая акустическая система от Warner Bros. использовала запись звука с фонографа, которую следовало синхронизировать с киноизображением. Cinerama использовала четыре соединённых друг с другом аппарата. В стереоскопическом кино начала 1950-х годов использовались два проектора, но ни одна из этих систем не получила дальнейшего развития (Рис.3).

Цифровое кино

За последние несколько лет в кинематографе происходят изменения, вызванные переходом с 35-мм цветной киноплёнки на цифровые технологии. Цифровая

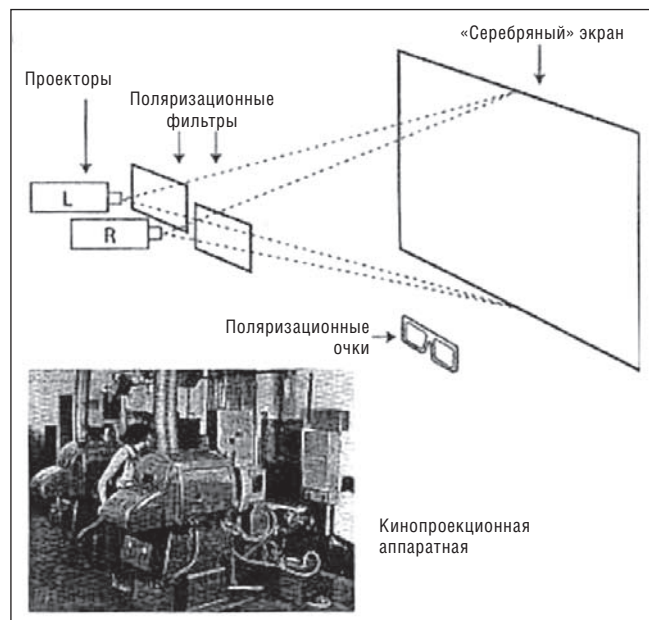


Рис. 3. 3D-показ в 1952-1953 годах.

Использовался метод поляризации света. Для сепарации изображений для левого и правого глаза. Требовался так называемый «серебряный» экран. Используемые для перехода с поста на пост проекторы перенастраивались под синхронную работу в режиме стереопоказа

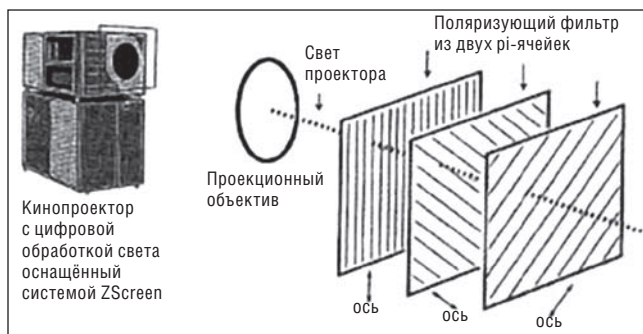


Рис. 4. Цифровая 3D- проекция. В случае с процессом Real D (и большей частью современных проекционных систем 3D) требуется только один проектор. В данном случае модулятор ZScreen переключает направление поляризации света с кадровой частотой проектора. ZScreen состоит из линейного поляризатора и двух pi-ячеек в спектральной серии. Pi-ячейки включаются и выключаются для создания лево- и правостороннего циркулярно поляризованного света синхронно с левосторонним и правосторонним с последовательной проекцией изображений для левого и правого глаза.

инфраструктура, являющаяся продуктом развития телевизионных и компьютерных технологий, затрагивает три области: захват кадра и генерацию изображения, окончательный монтаж и цифровую проекцию. Цифровая проекция находится на заре применения и насчитывает, по некоторым оценкам, около 135000 кинотеатров по всему миру, 4 000 из которых используют цифровые аппараты для проекции полнометражных фильмов, и практически все они используют цифровое микрозеркальное устройство (DMD), производимое компанией Texas Instruments и устанавливаемое на проекторах производства Christie, Barco и NEC-Ballantyne.

На дату написания данной статьи 720 таких цифровых проекторов были оборудованы для показа 3D с использованием процесса поляризации при последовательной передаче цветных сигналов по полям Real D. Предполагается, что к ноябрю 2007 года количество подобных установок достигнет 1 000 единиц, большая часть из них будет использоваться в США. Есть сведения, что небольшое число цифровых стереокинотеатров в Европе используют обтюраторные очки производства MasNaughton, и количество систем с использованием процесса выбора длины волны Dolby – усовершенствованной формы двухцветной стереограммы, будет, очевидно, установлено ко времени выхода фильма на студии Paramount *Beowulf* (режиссер Роберт Земекис). Создается впечатление, что 3D станет преобладать в цифровой проекции.

Стереоскопическое цифровое кино

Подобно всем предшествовавшим двухаппаратным технологиям, двухпроекторная стереоскопическая проекция представляется сомнительной. Сложно проециро-

вать стереоизображение, используя два проектора, даже в парках развлечений. Для получения успешного результата необходимо иметь специализированный персонал, а лучше также человека, который будет смотреть фильм из кинопроекторной по ходу его показа. Основываясь на личных впечатлениях после посещения большей части парков развлечений в Южной Калифорнии, замечу, что в половине случаев двухпроекторный стереоскопический показ, как плёночный, так и цифровой, приводили к существенным проекционным ошибкам, достаточным, чтобы испортить впечатление от просмотра.

Однопроекторная цифровая установка на базе ZScreen сделала демонстрацию стереоскопических фильмов более надёжной (Рис. 4). Кинотеатру понадобится вложить деньги в приобретение нового, так называемого «серебряного» экрана с алюминиевым покрытием, а также нового оборудования для проекции. Кроме того, в этом случае студиям придётся вложить дополнительные средства из-за удорожания производства стереоскопических фильмов. Тем не менее, по мере накопления опыта и новых разработок, расходы могут уменьшиться, как это произошло ранее с цветом, звуком и широким экраном.

Зрители, которые являются крупнейшими пайщиками, платят больше – лишний доллар или два – за просмотр стереоскопического фильма – это расходы по переоборудованию кинотеатров и производству 3D-очков. Сейчас зритель скорее пойдёт смотреть стереоскопическую постановку высочайшего качества в ближайший кинотеатр, нежели в парк развлечений. ZScreen проекция, к примеру, представляет собой повторяющийся однопроекторный процесс, а изображение, демонстрируемое в кинотеатре, имеет столь же высокое качество, как и то, которое было получено в лабораторном проекционном зале.

Съёмочная группа

Направление дальнейшего развития стереоскопического кинематографа будет определяться съёмочными группами, которые всегда живо интересовались возможностью добавления третьего измерения. Трёхмерное восприятие зависит от того, что психологи называют пространственным упорядочением, и по большей части, в настоящее время приходится наблюдать мир одним, нежели двумя глазами. Кинематографисты специализируются на том, чтобы использовать данное упорядочение для придания глубины однолинейному кино. Они используют свет, движущуюся камеру, правильный подбор объективов, дымку и туман, а также другие средства. Для них проблема всегда состояла в том, как заставить плоское изображение выглядеть трёхмерным. Стереоскопическое кино – кино двух глаз – предоставляет кинематографу новые возможности в стремлении создать трёхмерный мир.

Стереоскопическое производство остаётся в младенческой стадии, несмотря на то, что уже в течение ста лет предпринимались попытки его усовершенствовать.

До сих пор не хватало непрерывности в опытах, с помощью которых талантливые кинематографисты, режиссёры, съёмочные группы, руководители монтажа и др. стремились познать такое выразительное средство – и в настоящее время эта задача близка к своему завершению. Разрыв, который сопровождает внедрение новых технологий, вряд ли произойдёт ещё раз – тому порукой совершенное владение изобразительными средствами современными съёмочными группами. Частью моей работы является помощь съёмочным группам в выполнении этого перехода, и должен сказать, что они быстро обучаются, и им есть чему научить своих учителей.

Заключение

Целью настоящей статьи было продемонстрировать, что важнейшие изменения в технологии кинематографии создают экономические возможности для студий и кинотеатров и творческие возможности для съёмочных групп. Я углубился в этот вопрос потому, что мы находимся на очередном этапе исторического развития кинематографа. Анализируя недавние события и технологические успехи, становится ясно, что существуют основания верить, что стереоскопическое кино может, наконец, быть принято в арсенал выразительных средств кинематографии. Я надеюсь, что специалисты в этой отрасли смогут организовать своё сотрудничество таким образом, чтобы этот переход совершился с минимальным разрывом и дал новый импульс развитию творческого начала.

Как всегда, мы будем ожидать будущего, которое не познаваемо, однако я позволю себе сделать предсказание: я надеюсь, что стереоскопическое средство выражения позволит коренным образом преобразить кинематограф. Я надеюсь, что речь идёт не просто о возрождении стереоскопического кинематографа, но и об изменении кинематографии в целом. В конечном счёте, именно съёмочным группам предстоит исследовать потенциальные возможности трёхмерного кино и придать ему такие очертания, которые мы в настоящий момент не можем ни предсказать, ни вообразить.

Благодарность

Благодарю Ray Zone, который поделился со мной своими знаниями и поддержал меня в написании данной статьи, а также выражаю признательность Stephanie Boris за неустанную и восторженную редакторскую поддержку.

Список литературы

1. Lenny Lipton, «The Stereoscopic Cinema: From film to Digital Projection», SMPTE J., 110: 586-593, Sept. 2001.
2. Scott Eyman. The Speed of Sound: Hollywood and the Talkie Revolution. 1926-1930. Johns Hopkins University Press: Baltimore, MD, 1999.
3. Bosely Crowther, The Lion's Share, E.P. Dutton & Company: New York, NY, 1957.