

№9 СОДЕРЖАНИЕ



стр. 2

Новости, обзоры

Выставки, конференции 3



стр. 10

Технологии

И. Грицкова, С. Макарова, М. Саквалеридзе, А. Харлов, С. Левачёв
Свойства тонких плёнок латексов, модифицированных желатиной 5

А. Короленко, Л. Танин, П. Моисеенко, В. Маникало
Использование ахроматического объёмного изображения для повышения защитных свойств рельефных голограмм 9

В. Ванин
Фотография и голография – научные инструменты механистического и органистического (целостного) способа мышления, а также восприятия и моделирования окружающего нас мира 10



стр. 22

Доклады

А. Настас, А. Андриеш, В. Бивол, А. Присакар, И. Слепнёв, Г. Тридих
Регистрирующие структуры на базе халькогенидных стеклообразных полупроводников для голографии 22

Е. Безус, Д. Быков, Л. Досколович, И. Кадомин
Формирование интерференционных картин поверхностных электромагнитных волн с изменяемым периодом с помощью дифракционных решёток 25



стр. 28

И. Погань, А. Ивановский
Голографическая деметаллизация с высоким разрешением 28



стр. 33

Мастер-класс, семинары, новости SMPTE, отзывы

О. Андреева
Терминологический словарь по прикладной голографии 30

SMPTE Motion Imaging Journal by Thomas O. Maier, пер. В. Сычёва
Обработка цвета для цифрового кинематографа 3, 4 33

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 Министерства культуры
Российской Федерации

Редационный совет:
Комар Виктор Григорьевич, проф., д.т.н.
Саквалеридзе 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, Министерство культуры
Российской Федерации

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 № 944.
Тираж 1500 экземпляров.

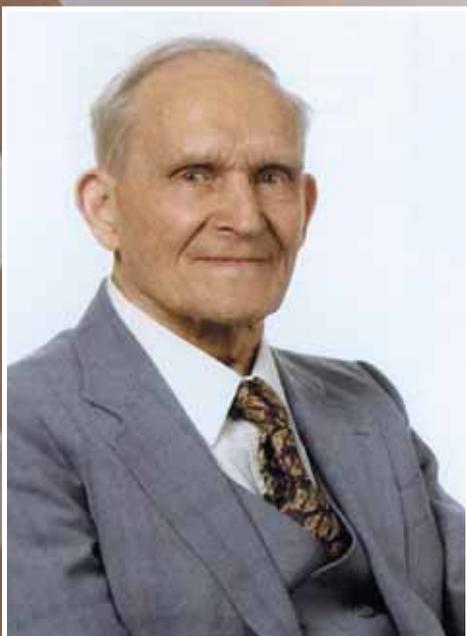
Свидетельство о регистрации
СМИ-ПИ № ФС77-28384 от 23 мая 2007 года.

Перепечатка материалов осуществляется только с разрешения редакции, ссылка на журнал обязательна. Редакция не несет 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



ПОЗДРАВЛЯЕМ Виктора Григорьевича Комара с днём рождения!



Дорогой Виктор Григорьевич! Вы внесли значительный вклад в развитие отраслевой науки – кинотехники, осуществляя научное и инженерно-техническое руководство при разработках систем широкоэкранный, широкоформатный, стереоскопический кинематографа, киносъёмочной, кинокопировальной аппаратуры. Разработки в области голографического кинематографа с цветным объёмным изображением до сих пор являются уникальными, а исследования по созданию различных систем стереокинематографа оказали огромное влияние на развитие этого направления в мире.

Вы и сегодня, продолжая работать в Научно-исследовательском кинофотоинституте, идёте в ногу с новейшими технологиями, являясь автором разработки национального стандарта в области цифрового кинематографа и руководителем работ по созданию учебной научно-технической литературы, необходимой для производства, показа и хранения кино-, видео- и телевизионных фильмов.

Вы создали хорошую школу, у Вас много учеников в нашей стране и за рубежом.

Вы были одним из инициаторов создания научно-технического журнала «МИР ТЕХНИКИ КИНО» и сегодня являетесь активнейшим членом редколлегии, а также автором статей.

Ваши знания, опыт, организаторские способности и многие человеческие качества, такие, как чрезвычайная ответственность, отзывчивость, деликатность и интеллигентность, очень помогают в работе нашего коллектива. Вы никогда не навязываете собственного мнения, а пытаетесь деликатно указать на наши промахи.

Редакция журнала сердечно поздравляет Вас с юбилеем и желает здоровья, здоровья и ещё раз здоровья и – дальнейшей плодотворной работы!

*Редколлегия журнала
«Мир техники кино»*





Выставки, конференции

■ С 1 по 3 июля 2008 года в Москве прошёл конференц-форум кинематографической общественности «**Российская киноиндустрия-2008: анонс будущего**». Форум организован к 100-летию российского кино. Работа конференц-форума началась с приветственного слова Министра культуры Российской Федерации Александра Авдеева. Организаторами конференц-форума выступили Министерство культуры РФ и независимая исследовательская компания Movie Research при участии Союза кинематографистов России, Гильдии продюсеров, Союза кинопромышленников и Международного пресс-клуба.

По итогам конференц-форума принят меморандум «**Становление эффективной российской киноиндустрии: согласованная политика государства, бизнеса и НКО**».

Участники конференц-форума кинематографической общественности «Российская киноиндустрия-2008: анонс будущего», представляющие интересы и мнения основных игроков отечественной киноиндустрии, обсудили текущую ситуацию в киноотрасли, а также возможности и перспективы её развития на среднесрочную перспективу. По результатам обсуждения участники выразили единую позицию по ряду ключевых вопросов развития отрасли, которая заключается в следующем.

Значительную роль будет играть в ближайшем будущем концентрация кинопроектов и ресурсов в нескольких ведущих кинокомпаниях, зарекомендовавших себя высоким качеством выпускаемой кинопродукции для массового зрителя.

При этом считать стратегически важным развитие ниши специализированной кинопродукции, в том числе арт-кино, на отечественном рынке кинопроката для повышения конкурентоспособности российского кино в целом.

В части государственной поддержки производства и проката требуется разработка детального механизма стимулирования производителей по итогам проката.

Следует признать крайне нецелесообразным для киноотрасли приватизацию существующих киностудий, сопряжённую с возможностью их перепрофилирования. Это неминуемо ведёт к постепенной утрате производственных мощностей, которые до настоящего времени составляют основу отечественного кинопроизводства.

Развитие новых проектов создания киностудий полного цикла следует считать стратегически важным направлением развития отечественной киноиндустрии.

Значительную роль в развитии отечественной киноиндустрии в ближайшем будущем будут играть современные технологии и инновации. Образ отечественной кинематографии формируется сегодня под воздействием стремительного развития технологий и трансформации образа жизни людей.

Принципиально важным для развития киноиндустрии является расширение прокатной площадки для обеспечения равного доступа населения России к услугам кинопоказа. Такое развитие возможно с применением механизмов государственно-частного партнёрства.

Рассмотреть возможность государственной поддержки в виде субсидий кинотеатрам (кинозалам), осуществляющим показ специализированной кинопродукции, и закрепить данное определение в ФЗ «О государственной поддержке кинематографии» – отечественного и зарубежного арт-кино.

Необходимо усиление борьбы с производителями контрафактной продукции с одновременной разработкой новых механизмов защиты авторских прав в связи с развитием новых технологий.

Поддержать решение о разворачивании системы единого электронного киновилета как принципиально важное для подъёма отечественной киноиндустрии, для повышения прозрачности и достоверности в отчётных данных о результатах проката отечественных и зарубежных фильмов.

Рекомендовать Министерству культуры разработать комплекс мер государственной политики по стимулированию развития ко-продукции России с зарубежными странами, в том числе предусматривать ежегодную государственную поддержку производства и продвижения фильмов ко-продукции в фиксированном объёме и внести изменения в ФЗ «О государственной поддержке кинематографии», смягчающие критерии, по которым кинопроект признаётся «национальным фильмом».

Серьёзного внимания требует вопрос развития механизмов саморегулирования в отрасли и включения некоммерческих организаций в этот процесс. Рекомендовать существующим некоммерческим организациям (в том числе, Гильдии продюсеров России) принять активное участие в подготовке проектов нормативных актов, затрагивающих сферу создания и использования аудиовизуальных произведений.

Сегодня наиболее эффективными инструментами продвижения кинофильмов являются телевизионная реклама и «сарафанное радио» – общение потребителей кинопродукции между собой. Однако по мере дальнейшей интернетизации страны значение первого инструмента снижается, а второго – увеличивается и видоизменяется. Это выражается в том, что современный кинозритель всё в большей степени становится не только потребителем, но и производителем-участником Интернет-контента – в первую очередь, в блогосфере и социальных сетях. В наиболее популярных сетях предоставляется бесплатный сервис, позволяющий формировать группы по предпочтениям – среди них уже появились группы, связанные с кинопроцессом. Отсюда первоочередными задачами продвижения кинопродукции в Сети становится формирование таких групп, участие и приобретение в них влияния.

Наряду с «простыми» группами возникает и очередной виток развития Интернет-пространства, обозначаемый сегодня как Web 3.0 – рекомендательные сервисы, когда потребители со сходными характеристиками выстраивают рейтинги собственных предпочтений, которые становятся мощнейшим рычагом рекламного воздействия. Отсюда осмысление и использование технологии Web 3.0 также становится весьма актуальным на кинорынке.

Необходимость активного применения указанных инструментов мотивируется ещё и тем, что сам Интернет

постепенно и неизбежно превращается в киноплощадку с сотнями миллионов зрителей.

В условиях увеличения количества киносетей и оборудованных на современном уровне кинозалов и, как следствие, обострения конкуренции, требуют изменения и традиционные маркетинговые стратегии продвижения кинопродукции. Увеличение предлагаемых в кинотеатрах сервисов; новые системы изготовления, бронирования, приобретения билетов; скидки должны дополняться широкими ко-брендинговыми предложениями (возможность после использования билета или карты кинотеатра льготного приобретения услуг других сегментов рынка).

Классические промо-стратегии должны сопровождаться усиленным вниманием к брендингу, обращением к таргетингу (поиску и воспитанию своих целевых групп), содержательному сегментированию кинотеатров и кинозалов, жёсткому этическому регулированию поведения как собственного персонала, так и зрителей.

В целом, участники признают, что развитие отечественной киноиндустрии возможно исключительно при взаимосогласованном участии государства, бизнеса и НКО, и считают крайне полезным организацию диалога между основными участниками киноотрасли в формате проведённого конференц-форума.

Подробнее о конференц-форуме читайте на сайте www.Российская киноиндустрия-2008: анонс будущего.

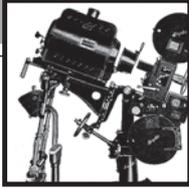


■ С 1 по 2 июля в Санкт-Петербурге прошла **5-я Международная Конференция «Голоэкспо – 2008»**. Развитие высоких технологий в настоящее время является одной из приоритетных задач мирового научно-технического прогресса. При этом одной из наиболее наукоёмких из них является технология оптической голографии, которую в настоящее время можно отнести к классу нанотехнологий.

В последние годы в России и за рубежом наблюдается интенсивное внедрение голографических технологий в самые различные отрасли науки, техники, экономики и искусства. Здесь, в частности, применяются научно-тех-

нические разработки в области защитной голографии, изобразительная голография и отображение трёхмерных объектов на основе оптических и голографических методов, голограммные и дифракционные оптические элементы, новейшие разработки в области регистрирующих сред для голографии и оптико-голографической памяти, голографическая интерферометрия.

Это говорит в пользу того, что ежегодные Международные конференции «ГОЛОЭКСПО», проводимые с целью обмена между специалистами новыми идеями, методами и опытом в рассматриваемой области, являются своевременными и актуальными. ■



СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЁНОК ЛАТЕКСОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛАТИНОЙ

И. А. Грицкова, д.х.н., проф., С. А. Макарова, аспирант,
МГАТХТ им. М. В. Ломоносова,
М. А. Сакварелидзе, д.х.н., проф., А. Е. Харлов, МКВИ,
С. М. Левачёв, к.т.н., МГУ им. М. В. Ломоносова

■ В работе [1] показано применение полистирольных латексных частиц в качестве антифрикционных покрытий светочувствительных слоёв, что имеет большое практическое значение при эксплуатации и хранении плёночных материалов кинофильмов.

При практическом использовании латексов необходимо управлять их устойчивостью к агрегированию. В настоящее время количественно развиты две теории устойчивости дисперсных систем: ДЛФО [2] и структурно-механический барьер по Ребиндеру [3]. Тенденция частиц к слипанию определяется энергией притяжения, обусловленной межмолекулярным взаимодействием.

В теории ДЛФО отталкивание частиц, приводящее к повышению устойчивости дисперсии, определяется свойствами двойного электрического слоя (ДЭС), величиной электрохимического потенциала, зарядом поверхности и распределением потенциала по мере удаления от заряженной твёрдой поверхности. Для характеристики ДЭС обычно экспериментально определяют электрокинетический потенциал частиц ζ -потенциал (мВ).

В теории структурно-механического барьера по Ребиндеру повышение устойчивости или отталкивания частиц осуществляется за счёт формирования толстых межфазных адсорбционных слоёв, образованных из высокомолекулярных соединений на поверхности дисперсных частиц. Для выяснения механизма взаимодействия частиц латексов, модифицированных желатиной, удобно исследовать двумерное (2D) состояние систем, содержащих латексные частицы, которые формируют на границе вода/воздух периодические коллоидные структуры [4].

Целью данной работы было исследование 2D-плёнок полистирольного латекса, модифицированного желатиной.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для модификации полистирольного латекса использовалась желатина, полученная из костной ткани крупного рогатого скота щелочным методом. Молекулярно-массовое распределение желатины определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на колонках фирмы Hewlett Packard. Средняя молекулярная масса желатины составила 95,1 кДа.

Полистирольный латекс, представляющий собой микросферические частицы, получали затравочной полимеризацией стирола на полистирольных затравочных частицах со средним диаметром 0,9 мкм. Полимеризацию проводили в условиях, исключающих образование новых частиц, в отсутствие поверхностно-активных веществ (ПАВ), используя в качестве инициатора персульфат калия.

Распределение частиц по размерам полистирольного латекса определяли на приборе «Malvern» методом квазиупругого рассеяния лазерного света (рис. 1). Распределение частиц по размерам очень узкое, с наиболее вероятным диаметром 1,127 мкм.

Электрокинетический потенциал (ζ -потенциал) латексных частиц, по данным электрофоретической подвижности, составил в среднем -32,2 мВ (рис. 2) (определение электрофоретической подвижности проведено на приборе «Malvern»).

Модификация полистирольного латекса производилась путём адсорбции желатины на поверхности латексных частиц из водного раствора при 60°C в течение 13 часов. Желатина для модификации была взята в количестве 0,2% от массы сухого латекса. После завершения процесса адсорбции суспензия подвергалась центрифугированию. Двукратная промывка частиц полистирольного латекса приводит к полному удалению избыточной

(не адсорбированной) желатины. Для модифицированных латексных частиц также было определено распределение по размерам (наиболее вероятный диаметр составил 1,276 мкм) и ζ -потенциал (-22,4 мВ) (соответственно, рис. 1 и 2).

Приготовление раствора для субфазы. Водный раствор сульфата аммония с концентрацией 0,4 моль/л, готовили путём растворения реактива $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (хч) в бидистиллированной воде. РН субфазы = 5,48 (20°C).

Формирование 2D-слоёв латексных частиц. Для получения устойчивых поверхностных слоёв частиц полистирольного латекса на субфазу наносилась смесь, состоящая из 750 мкл водной 0,1% суспензии латекса и 750 мкл этилового спирта (для лучшего растекания частиц по поверхности субфазы).

Прибор для изучения монослоёв. Для формирования и исследования монослоёв в работе использовалась ванна Ленгмюра кругового типа [5]. Прибор позволяет регистрировать изменение поверхностного натяжения в процессе изменения площади плёнки вещества, нанесённого на поверхность раздела фаз жидкость/воздух. Двумерное давление (π) измеряли с помощью пластины Вильгельми.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для иллюстрации эффекта модификации поверхности полистирольных латексных частиц желатиной на рис. 3 сопоставлены изотермы сжатия поверхностного слоя немодифицированных латексных частиц (кривая 1) и модифицированных желатиной (кривая 2). Модификация желатиной сводится к её физической адсорбции на поверхности полистирольных латексных частиц с образованием адсорбционного слоя. Толщину адсорбционного слоя желатины на латексах можно оценить по данным кривых распределения частиц полистирольного латекса по размерам – до и после модификации желатиной (рис. 1 и 2). Диаметр латексных частиц увеличивается на 0,149 мкм (с 1,127 мкм до 1,276 мкм), следовательно, толщина адсорбционного слоя желатины составляет примерно 0,075 мкм (75 нм). На рис. 3 на врезке показана схема строения частицы латекса, модифицированного желатиной. По данным работы [6], толщина адсорбционного слоя желатины, определённая методом малоуглового нейтронного рассеивания света (рис. 3, врезка, слой а), составила 11 ± 3 нм, при плотности адсорбционного слоя 72 ± 14 мг/см³, а по данным динамического светорассеивания (слой б) толщина – 41 ± 3 нм, с плотностью 28 ± 7 мг/см³. Отличие данных по толщине адсорбционных слоёв желатины на частицах латекса может быть связано с различными условиями адсорбции, размерами латексов, а также и со свойствами использованной желатины.

Из рис. 3 (кривая 2) видно, что модификация латексов желатиной приводит к заметным изменениям свойств поверхностных плёнок, частицы становятся более гидрофильными, давление коллапса (π_c) снижается с 39 до

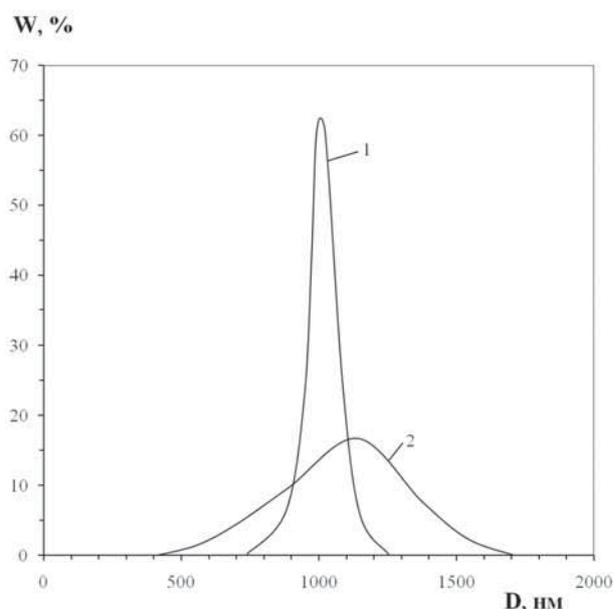


Рис. 1. Распределение по размерам частиц полистирольного латекса, полученного затравочной полимеризацией (1) и того же латекса, модифицированного желатиной (2)

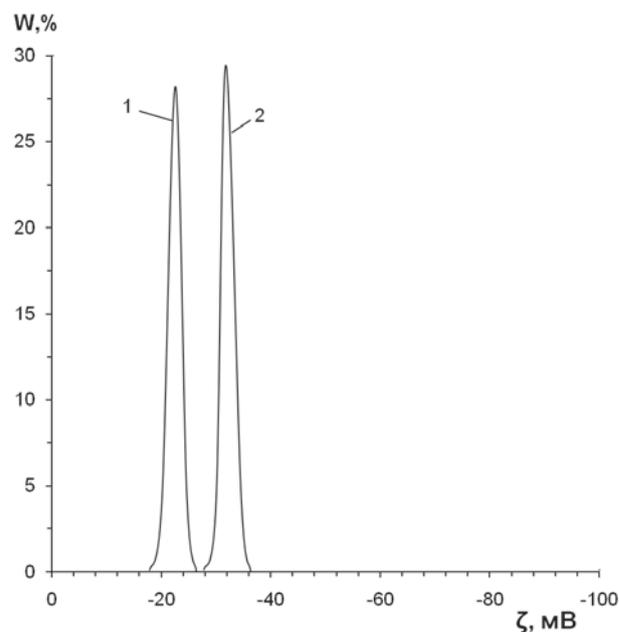


Рис. 2. Значение электрокинетического потенциала (ζ , мВ) частиц полистирольного латекса, полученного затравочной полимеризацией (1) и того же латекса модифицированного желатиной (2). Модификация латекса проводилась в водном растворе желатины в количестве 0,2% от массы сухого латекса при 60°C, с последующим удалением избытка желатины. Данные получены на приборе «Malvern».

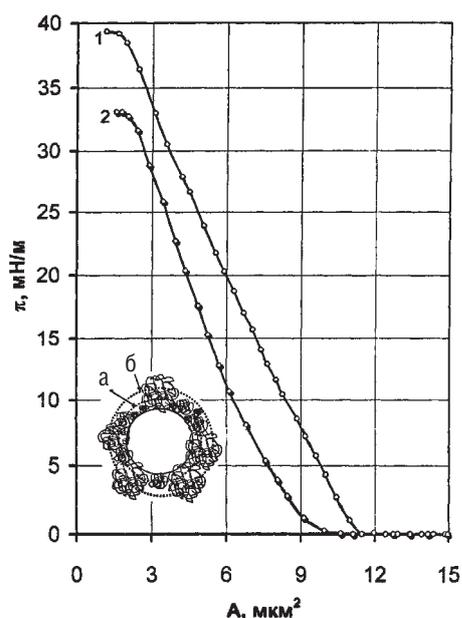


Рис. 3. Изотермы сжатия поверхностного слоя частиц полистирольного латекса, полученного на водном 0,4М растворе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ($\text{pH}=5,48$; $t=20^\circ\text{C}$): 1 – исходный, немодифицированный латекс, 2 – модифицированный желатиной латекс (0,2% желатины от массы сухого полистирольного латекса). На врезке показана схема строения латексной частицы, модифицированной желатиной: а) толщина адсорбционного слоя по данным малоуглового нейтронного рассеивания – 11 ± 3 нм; б) по данным динамического светорассеивания – 41 ± 3 нм

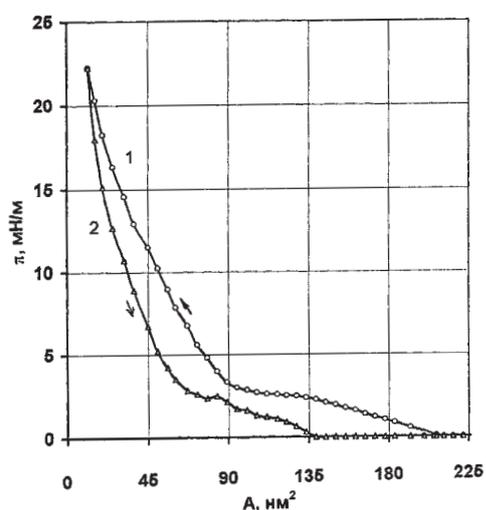


Рис. 4. Изотермы сжатия (1) и растяжения (2) монослоя желатины, полученные нанесением 20 мкл 0,1% водного раствора желатины на поверхность 0,4М раствора $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ($\text{pH}=5,48$; $t=20^\circ\text{C}$).

33 мН/м, а изотерма модифицированного латекса смещается в сторону меньших площадей на частицу. Так, начало подъёма изотермы для исходного латекса (кривая 1) соответствует площади 11,5 мкм² на частицу, а для модифицированного латекса (кривая 2) – 10 мкм². Отметим также, что площади на частицу (A) при давлении коллапса (π_k) различаются: для кривой 1 – $\pi_k=1,3$ мкм², а для кривой 2 – $\pi_k=2$ мкм². По-видимому, это можно объяснить увеличением диаметра латексной частицы вследствие образования на её поверхности адсорбционного слоя желатины.

Для изучения влияния модификации полистирольного латекса желатиной на изотермы двумерного давления исследованы изотермы π - A монослоев желатины. На рис. 4 приведена изотерма сжатия (1) и растяжения (2) для мономолекулярного слоя желатины, полученного в тех же условиях, что и поверхностные слои латексов. Изотермы, приведённые на рис. 3 и 4, отличаются между собой. Площадь начала подъёма изотермы монослоя желатины много меньше, чем для латексных частиц (200 нм² и 10-11 мкм²). Все три изотермы различаются по величине давления коллапса (π_k). Латекс, модифицированный желатиной, по значению $\pi_k=33$ мН/м занимает промежуточное положение между желатиной ($\pi_k=23$ мН/м) и немодифицированным латексом ($\pi_k=40$ мН/м). Различие в значениях двумерного давления сжатого монослоя желатины и монослоя частиц полистирольного латекса свидетельствует о различном строении сжатых поверхностных плёнок.

Для прямолинейных участков изотерм π - A (рис. 3, кривые 1 и 2, рис. 4, кривая 1) определены параметры поверхностных слоёв: модули эластичности ε ($\Delta\pi/\Delta\ln A$, мН/м) и поверхностные химические потенциалы γ , Дж/г ($\Delta\pi/\Delta\Gamma$, где Γ – поверхностная концентрация вещества г/м²). Эти параметры составили: для поверхностного слоя исходного латекса $\varepsilon=17,7$ мН/м, $\gamma=1,8\cdot 10^{-11}$ Дж/г, для поверхностных слоёв латексных частиц, модифицированных желатиной, $\varepsilon=22,6$ мН/м, $\gamma=0,1\cdot 10^{-11}$ Дж/г и для конденсированного монослоя желатины $\varepsilon=9,7$ мН/м и $\gamma=1,4\cdot 10^{-14}$ Дж/г. Таким образом, все изученные системы заметно различаются по свойствам и структуре. По данным электрофореза латексных частиц, при их модификации ζ -потенциал снижается с -32,2 до -22,4 мВ, что, безусловно, свидетельствует об уменьшении вклада электростатического отталкивания в поверхностных слоях частиц полистирольного латекса, модифицированного желатиной.

Как в случае желатины (рис. 4, кривая 2), сжатые поверхностные слои полистирольного латекса и латекса, модифицированного желатиной, обнаруживают гистерезис при растяжении (рис. 5, кривая 2 и рис. 6, кривая 2). На врезках рис. 5 представлено возможное расположение частиц полистирольного латекса: а – предельно плотная упаковка частиц, соответствующая максимально сжатому слою; б – поверхностный слой после растяжения до низких давлений. В этом случае на поверхности субфазы

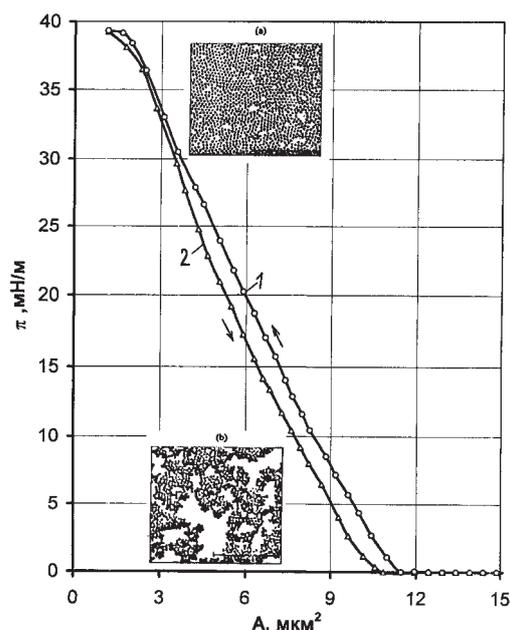


Рис. 5. Гистерезис поверхностного слоя частиц полистирольного латекса, полученного на водном 0,4М растворе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (рН=5,48; $t=20^\circ\text{C}$): 1 – изотерма сжатия; 2 – растяжения. На врезках показано состояние поверхностного слоя частиц полистирольного латекса ($d=2,6$ мкм) на поверхности раствора хлорида натрия: а) максимально плотная упаковка частиц (коллапс); б) поверхностный слой после расширения из состояния коллапса.

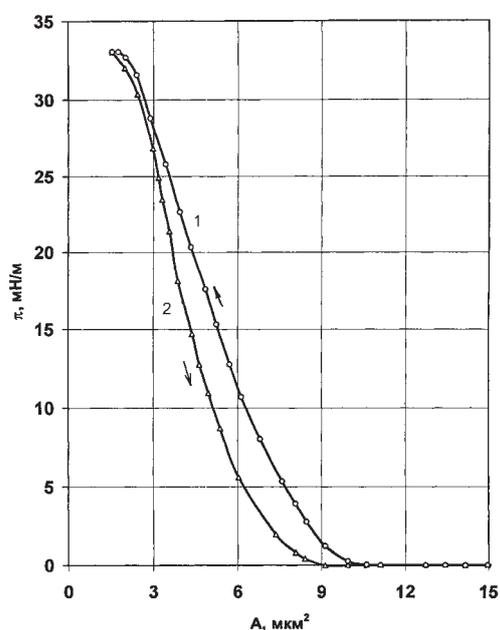


Рис. 6. Гистерезис поверхностного слоя частиц полистирольного латекса, полученного на водном 0,4М растворе $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (рН=5,48; $t=20^\circ\text{C}$) и модифицированного желатиной (0,2% желатины от массы сухого полистирольного латекса): 1 – изотерма сжатия; 2 – растяжения.

имеются кластеры, образующиеся при разрушении поверхностной супрамолекулярной структуры (врезка б). Кривые 2 на рис. 5 и 6 свидетельствуют о затруднённом распаде образующихся агрегатов при растяжении. Спустя некоторое время поверхностные слои, сжатые до $\pi=0$, $A=10$ мкм², релаксируют до площади примерно 11,5 мкм², и при повторном сжатии кривая сжатия повторяет ход кривой 1. Следовательно, можно сделать вывод о кинетическом характере гистерезисных явлений.

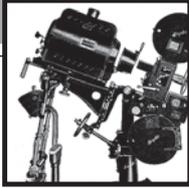
Таким образом, в данной работе были синтезированы частицы полистирольного латекса с узким распределением по размерам. Методом квазиупругого рассеяния лазерного света определены толщины адсорбционных слоёв желатины на частицах полистирольного латекса, определён электрокинетический потенциал частиц. Получены изотермы двумерного давления поверхностных слоёв исходного латекса и латекса, модифицированного желатиной, и определены модули эластичности слоёв. Изучение гистерезиса показало, что вследствие агрегации частиц латекса при $\pi \leq \pi_k$ (π_k – двумерное давление коллапса) возникает 2D – упорядоченная структура, разрушение которой при разрушении поверхности определяет кинетический характер гистерезиса.

В работе изучена двумерная модель систем, содержащих модифицированные латексы. Эти результаты можно перенести на трёхмерную объёмную модель в системах, содержащих латекс как наполнитель или пластификатор, или как синтетический носитель биолигандов при производстве диагностических тест-систем. Одной из важнейших проблем является обеспечение устойчивости таких систем на всех стадиях применения.

Полученные экспериментальные результаты показали возможность управлять агрегацией частиц латекса, это позволяет дать рекомендации о концентрации и способе введения модифицированных латексов при изготовлении и нанесении антифрикционных покрытий плёночных материалов. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Сакварелидзе М.А., Левачев С.М. Антифрикционные покрытия плёночных материалов на основе полистирольных микросфер // Журнал «Мир техники кино», 2007, № 3, с. 6.
2. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. М.: Высшая школа, 1992.
3. Измайлова В.Н., Ямпольская Г.П., Туловская З.Д. // Коллоидный журнал, 1998, т. 60, №5, с. 598.
4. Ефремов И. Ф. Периодические коллоидные структуры. Л.: Химия, 1971.
5. Измайлова В.Н., Ямпольская Г.П., Туловская З.Д., Левачёв С.М. Мономолекулярные слои поверхностно-активных веществ на границе жидкость/воздух. // Методические разработки к спецпрактикуму по коллоидной химии. М.: Изд. МГУ, 1999.
6. Vaynberg K.A., Wagner N.J., Sharma R., Martic P. // Journal of colloid and interface sci., 1998, V. 205, № 1, p. 131-140.



Использование ахроматического объёмного изображения для повышения защитных свойств рельефных голограмм

А. А. Короленко, В. В. Маникало, ООО «Магия света»,
Л. В. Танин, П. В. Моисеенко, ЗАО «Голографическая
индустрия», г. Минск, Республика Беларусь

В докладе рассмотрены свойства ахроматического объёмного изображения, записанного на фоторезисте. Целью работы являлось создание объёмного ахроматического изображения, которое можно было бы массово тиражировать и использовать в качестве голографического защитного элемента.

■ Изображение характеризуется тем, что его голографическая решётка имеет неупорядоченный пилообразный профиль. Данное свойство является ключевым, что в сочетании с объёмностью используется для изготовления голографических защитных элементов, труднодоступных для подделки, копирования и имитации.

Ахроматическое объёмное изображение характеризуется также асимметричностью профиля решётки. Копирование такой структуры классическими аналоговыми способами невозможно, т.к. аналоговое голографическое копирование не позволяет воспроизвести структуру с асимметричным профилем.

В качестве примера на рис. 1 приведён образец записанного изображения металлической монеты «1 Рубль» размером 30×30 мм. Проведён анализ поверхностной структуры никелевой матрицы с данным изображением

в различных его участках при помощи атомно-силового микроскопа. Один из результатов анализа приведён на рис. 2 и рис. 3.

Голографический рельеф поверхности в местах, где присутствует изображение металлической монеты, характеризуется асимметричным неупорядоченным профилем. Высота рельефа существенно варьируется в пределах нескольких периодов решётки. Такая картина наблюдается во всех направлениях изображения и напоминает «гористую местность». В тех местах, где ахроматическое изображение отсутствует, голографическая решётка имеет синусоидальный профиль.

Образец голограммы изготовлен комбинированным внеосевым методом и сочетает в себе свойства объёмной отражательной голограммы и рельефной радужной голограммы. ■



Рис. 1

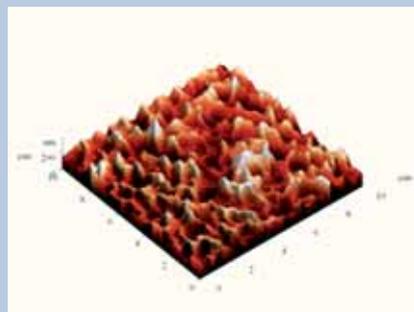


Рис. 2

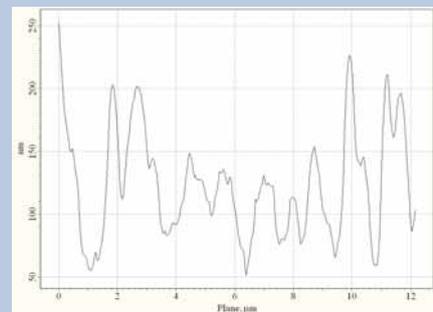
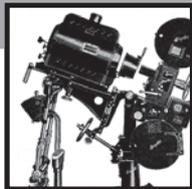


Рис. 3



ФОТОГРАФИЯ И ГОЛОГРАФИЯ – научные инструменты механистического и органистического (целостного) способов мышления, а также восприятия и моделирования окружающего нас мира

В. А. Ванин, к.т.н., Мособлзнак

« На свете столько тайн, Горацио,
Что и не снилось нашим мудрецам...»
(В. Шекспир, « Гамлет»)

■ Введение

В этой статье хотелось бы продолжить обсуждение идей и вопросов, затронутых мною в двух предыдущих статьях: «Изобразительная голография – ретроспективный обзор» и «Голографическая парадигма мира».

Тема эта касается особой роли голографии в формировании нового взгляда на окружающий нас мир. Обоснованием целесообразности обсуждения этих вопросов является нарастающий объём информации по использованию голографической аналогии для объяснения сложных, либо вовсе непонятных явлений в различных областях жизни. Весь спектр этой информации можно условно разделить на три части:

1. монографии известных учёных, посвящённых определяющей роли голографии в смене существующих концепций, в том числе:

- по мироустройству (Бом Д. «Полнота и имплицитный порядок», 1980);
- в биологии, по функционированию мозга человека (Прибрам К. «Языки мозга», 1975);
- по созданию универсальной философии, объединяющей существующие подходы Запада, Востока и России (Югай Г. «Голография вселенной и новая универсальная философия», 2007);

2. научно-популярная литература высокого уровня, представляющая устройство окружающего нас мира с позиций голографии, в том числе:

- Талбот М. «Голографическая Вселенная», 2004;
- Тихоплав В., Тихоплав Т. «Новая физика веры», 2007;

3. большое число работ, в том числе в Интернете, о метафизических (сверхчувственных) формах бытия.

Возникает естественный вопрос: «Почему появился такой интерес к голографии у людей, занимающихся изучением различных аспектов нашей жизни». Логично было бы корни этого интереса искать в свойствах голо-

граммы и голографического способа описания мира. Я бы выделил три основных свойства, а именно:

- применяемость для всех видов волновых полей (даже для таких «новых», как биополя и торсионные поля);
- распределение информации о каком-то событии, или точки объекта, по всему полю голограммы;
- возможность ассоциативного поиска и обработки информации.

Я полагаю, что эти свойства голографии и выдвинули её на роль перспективной модели устройства нашей вселенной, что и явилось главным побудительным моментом широкого к ней интереса. Посмотрим, что же нас не устраивает в существующей модели Мира, и какова миссия Голографии.

Но прежде, позвольте привлечь ваше внимание к выдающейся личности – Дэвиду Бому, который ввёл понятие «Голографическая модель вселенной» и обосновал её значимость.

Дэвид Бом – известный физик-теоретик, коллега Эйнштейна. В 40-50 гг. XX в. они оба работали в Принстонском университете и во многом имели сходные точки



Рис. 1

Дэвид Бом – автор гипотезы о голографичности мироздания
Юрий Денисюк – основоположник российской голографии

зрения на трудности квантовой теории и пути их преодоления. Здесь Девид Бом не случайно изображён вместе с Ю. Н. Денисюком. Дэвида Бома знаю по публикациям, а Ю. Н. Денисюка я знал лично, но скажу вам, что оба очень похожи по своей сути. Они обладали какой-то сверхъестественной способностью проникновения в тайны бытия, сохраняя при этом строгость научного подхода к изучаемым явлениям природы.

Механистический и органистический (целостный) подходы в восприятии мира

В течение всей истории человечества существовала последовательность общих представлений об устройстве мироздания. Каждое из них выражало сущность духа своего времени, и каждое, в свою очередь, глубоко воздействовало на личность и на общество в целом – не только физически, но и психологически и этически. Эти воздействия были по природе своей многообразны, но среди них всех одним из самых значимых являлось представление об универсальном порядке.

Приведём два наиболее характерных примера. Первый из них – это представление древних греков о Земле как о центре Вселенной и о семи концентрических сферах в небесах, располагающихся в порядке возрастающего совершенства их природы. Вместе с Землёй они составляли неделимый организм. Считалось, что Человек обладает во всей этой системе центральной значимостью. Напротив, в современных взглядах Земля – лишь пылинка в громадной Вселенной материальных тел: звёзд, галактик и тому подобного, а они, в свою очередь, тоже состоят из атомов, молекул и выстроенных из них структур, как если бы были частями вселенской машины. Её основной порядок – это порядок независимо существующих частей, слепо взаимодействующих посредством сил, прилагаемых ими друг к другу. Крайним выводом такого механистического воззрения на универсальный порядок будет, разумеется, то, что Человек в основе своей незначим. Появление теории относительности и квантовой теории существенно подорвали основы механицизма прежде всего своей единой основой, которой является ненарушаемая целостность Вселенной.

Как видите, каждое мировоззрение содержит в себе собственные основные представления о порядке. Поэтому перед нами возникает естественный вопрос: возможно ли развить новый порядок, удобный для того, чтобы размышлять об основной природе «Вселенной ненарушенной целостности»? Однако это подводит нас к следующему вопросу: что есть порядок? Этот вопрос не так прост, как может показаться на первый взгляд. На самом деле невозможно дать обобщённое определение порядка. Вот несколько примеров для иллюстрации: порядок чисел 1, 2, 3, 4; порядок точек в линии; порядок функционирования в машине; тонкий порядок функционирования организма; множество порядков тонов в музыке; порядок времени; порядок языка; порядок мышления и так далее. Поэтому примем как данность, что мы уже знаем

кое-что о понятии порядка. Логично возникает вопрос: а не существует ли в нашем опыте аналогий, которые были бы применимы к механистическому и к органистическому (целостному) порядкам устройства нашего мира.

Фотография и голография – научные аналогии различного рода порядков организации вселенной

Мы не всегда задумываемся, что работа научных инструментов играет ключевую роль в прояснении некоторых понятий порядка и формировании способов мышления. Обратимся к Рис. 2, на котором схематически представлены фотографический и голографический способы построения изображения предмета ABC. При записи фотографии предмета точки A, B, C отображаются линзой с неким приближением в точки A', B', C'. Теперь таким же образом мы можем рассмотреть вместе все точки изображения и у нас получится фотография предмета. Это составляет некое знание о предмете, в котором мы подчёркиваем поточечное соответствие между изображением и предметом. Следовательно, мы выделяем концепцию точек. С помощью телескопов, микроскопов, очень быстрых или очень медленных камер этот вид знания посредством соответствия точек может быть распространён на вещи слишком далёкие, слишком маленькие, слишком быстрые, слишком медленные для того, чтобы видеть их невооружённым глазом. Рано или поздно мы придём к выводу, что всё, в конечном итоге, может быть познано в форме отдельных элементов. Это показывает, что инструменты, основанные на линзе, дали гигантский толчок механистическому способу мышления не только в науке, но и во всех фазах жизни. Потому фотография и появилась в период наивысшего расцвета механистической теории и существенно укрепила её позиции. Столь же закономерно и появление голографии в период утверждения в научном мировоззрении квантовой теории и теории относительности. Способ представления информации в голограмме в корне отличается от фотографического способа. Главным является то, что каждая часть голограммы содержит информацию о целом предмете, иными словами, информация о целом свёрнута в каждой части изображения. Конечно, на Рис. 2 показана лишь статическая запись света. Действительность же – это непрерывное движение волн, в котором информация о целом предмете динамически свёрнута в каждой части пространства, а потом развёрнута в изображении. Сходный принцип свёрнутости и развёрнутости можно наблюдать в широком спектре опыта. Например, свет от каждой части комнаты содержит информацию обо всей комнате и свёртывает её в крохотном участке, который проходит через зрачок нашего глаза, развёртывается хрусталиком, и нервная система, мозг и каким-то образом сознание производят ощущение целой комнаты. Свет, проникающий в телескоп, сходным образом свёртывает информацию обо всей вселенной пространства и времени. И, говоря более обобщённо, движения всевоз-

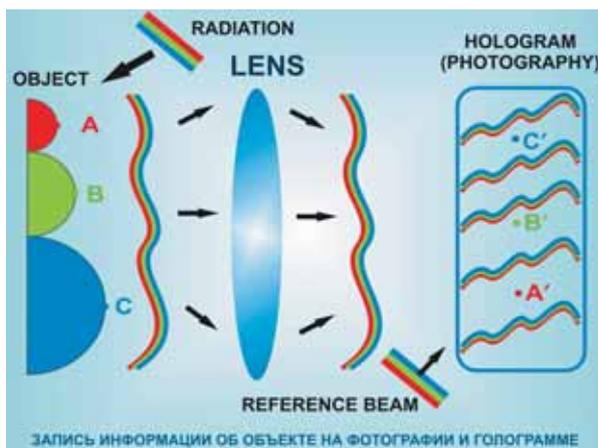


Рис. 2. Запись информации об объекте на фотографии и голограмме

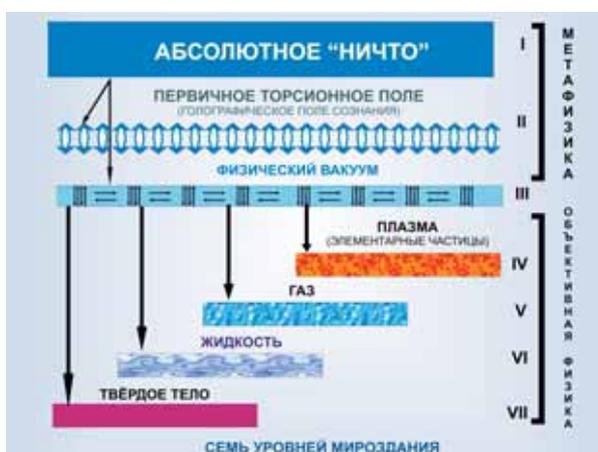


Рис. 3. Семь уровней Мироздания

можных волн свёртывают целое в каждой части Вселенной. Этот принцип свёртывания и развёртывания можно наблюдать и в более привычном контексте. Например, информация, из которой формируется телевизионное изображение, свёрнута в радиоволне, которая переносит её как сигнал.

Функция телевизионного приёмника лишь развернуть эту информацию и продемонстрировать её на экране. Как такое возможно? Квантовая теория показывает, что так называемые частицы, составляющие материю, также являются волнами, сходными со световыми. В принципе, можно изготавливать голограммы, используя лучи электронов, протонов и так далее. Ключевым моментом является тот факт, что математические законы квантовой теории, которые могут применяться к этим волнам и, следовательно, ко всей материи, могут описывать такое движение непрерывного свёртывания целого в каждый участок вместе с развёртыванием каждого участка снова в целое. Бом называет это уни-

версальное движение свёртывания и развёртывания «голодвижением» и считает его основной Реальностью нашей Вселенной. Таким образом, порядок мира, как структуры вещей, получается вторичным и возникает из более глубокого скрытого порядка. Порядок элементов, внешних по отношению друг к другу, будет тогда называться «развёрнутым порядком» или «явным порядком». Голография – это, конечно, всего лишь частный пример скрытого порядка. Ценность его в настоящем контексте в том, что он обеспечивает хорошую аналогию того, как именно скрытый порядок значим для квантового поведения материи.

Голографические свойства окружающего нас мира

Окружающий нас мир можно рассматривать с позиций физики, оперирующей данными опыта и метафизики, использующей внечувственные формы познания Бытия. На наш взгляд, гармоничное объединение обоих подходов даёт схема Мироздания, представленная на Рис. 3. На этом рисунке наглядно показана дискретность, квантованность Мироздания как целого в виде семи структурных уровней, разделённых в то же время на объективную и субъективную физику (метафизику). Такое представление нашего Мира известно ещё из ведических источников, датированных 4000-2000 гг. до н.э.

В них, в частности, постулировалось существование некоей Праматерии, из которой рождается всё и в которую всё возвращается. Надо отметить, что с точки зрения современной физики именно физический вакуум (третий уровень) и представляет собой ту первичную среду, которая является Праматерией или, с точки зрения материалиста, материальной средой, не содержащей собственно вещества. Уровни с седьмого по четвёртый – то, что хорошо известно из средней школы: твёрдые тела, жидкости, газы и элементарные частицы или плазма, порождаемые Физическим вакуумом.

Абсолютное ничто – это среда (некий Сверхразум, подобный мыслящему океану из «Соляриса» Станислава Лема), которая создает программы возможных вариантов структуры и развития Вселенной. Для реализации этих программ необходимо некое активное воздействие, или, можно сказать, для этого нужны воля и сознание (внешнее намерение). В зависимости от нашей Веры этот уровень может также называться «Абсолютом» или Богом. Второй уровень представляет собой динамическую трёхмерную голограмму, заполняющую всё пространство Вселенной и содержащую в себе её программы развития, сформированные Сверхразумом. Поскольку предполагается, что эта голограмма образована торсионными полями, Второй уровень ещё носит название «Первичного торсионного поля». На рис. 4 приведена эволюция эмбриона Человека, исходя из данной концепции Мироздания:

– из «ничего» («физического вакуума») зарождается сфера («яйцеклетка»), которая затем, в результате последовательного деления, вначале превращается в один тетраэдр (4 клетки), а затем при 8 клетках – в два взаи-

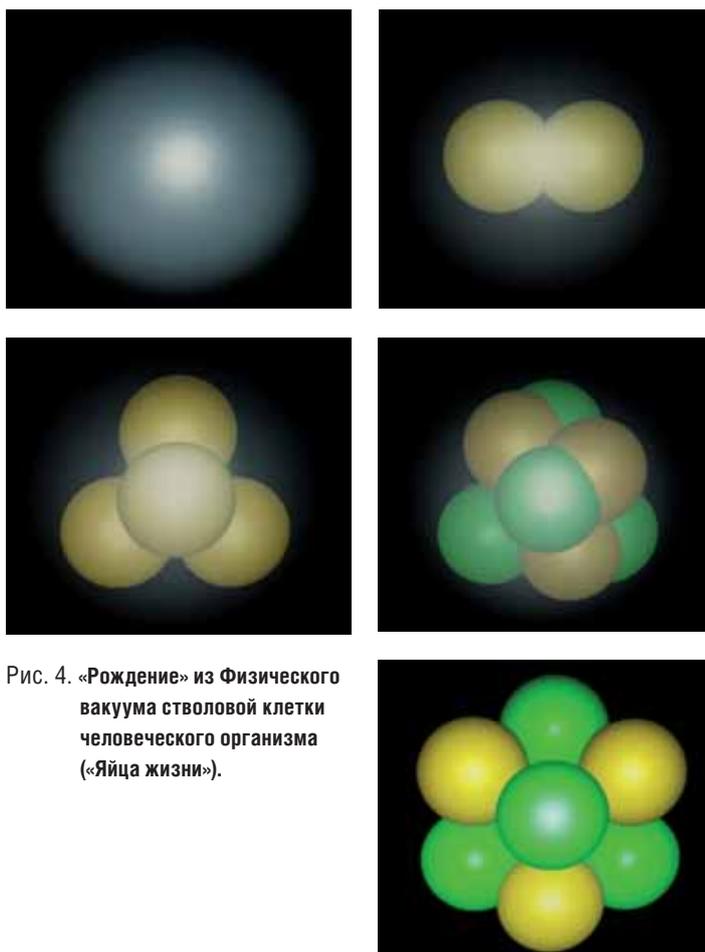
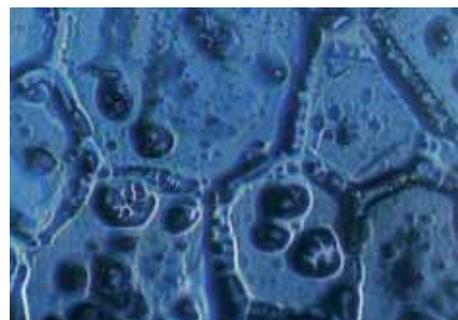


Рис. 4. «Рождение» из Физического вакуума стволовой клетки человеческого организма («Яйца жизни»).



а)



б)

Рис. 5. Воздействие Сознания на Материю:
а) кристалл воды после воздействия слов «ты хороший»
б) кристалл воды после воздействия слов «ты дурак»
(из книги Масару Эмото «Послания воды. Тайные коды кристаллов льда»)

мопроникающих тетраэдра (т. н. звёздный тетраэдр, или «Яйцо жизни»). Говорят, это есть те самые стволовые клетки, которые не умирают и несут информацию обо всём организме, подобно голограмме.

Отметим важный момент, что основным порядком организации трёх высших уровней («Абсолютного «ничто», «Первичного торсионного поля» и «Физического вакуума») является голодвижение, а это означает, что информационное содержание этих уровней динамично обновляется и присутствует в полном объёме в каждой точке Вселенной. Наше Сознание, взаимодействуя с голографическим полем второго уровня, может изменить его матрицу, что в свою очередь приведёт к изменению структуры материи.

На рис. 5 приведены две фотографии структуры кристаллов воды, взятые из книги Масару Эмото «Послания воды», при воздействии на неё слов «ты хороший» и слов «ты дурак». Можно видеть, что красота и гармония кристаллов в первом случае полностью разрушается при негативном воздействии слов «ты дурак».

Некоторые следствия применения голографической модели

Из существующих феноменологических теорий, объясняющих устройство Мира, голографическая модель

наиболее полно связывает научные и метафизические знания, накопленные человечеством. Остановимся на некоторых следствиях её применения, близких к теме этой статьи:

1. Окружающий нас Мир представляет собой калейдоскоп из различного рода волновых полей. Д.Бом называет его Голодинамикой. Видимую нами Реальность мы формируем с помощью своего Сознания, которое подобно лучу лазера выбирает «Наш мир» из возможного многообразия миров, представленных в Голодинамике. Мысль эта не нова, просто Бом пришёл к ней с позиций научной логики, а Карлос Кастанеда – после знакомства с учением толтеков (магов древней Мексики). По этому учению Человек представляет собой скопление энергетических полей в виде светящейся сферы. На этой сфере есть особое пятно – «Точка сборки», в которой сходятся мириады энергетических полей в форме светящихся волокон, из которых состоит Вселенная. Собираясь в этой точке, они превращаются нашим Сознанием в окружающий нас чувственный мир. Чтобы увидеть другой мир, нужно просто сместить «Точку сборки», однако сделать это не просто, поскольку она про-

чно удерживается коллективным Сознанием всего Человечества.

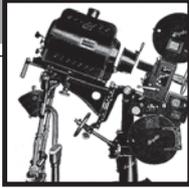
2. В эту схему также хорошо вписывается и «Морфогенный резонанс», открытый английским ученым Шелдрейком. Согласно его теории, повторение какого-то события приводит к образованию «морфогенного поля», и резонанс с этим морфогенным полем увеличивает вероятность того, что данное событие произойдет снова. Самое важное в теории Шелдрейка то, что «морфогенный резонанс» не зависит от времени и пространства.
3. По К. Прибраму (автору книги «Языки мозга») наше мышление во многом голографично. При таких сложных операциях, как распознавание образов, ассоциативный поиск информации, прогнозирование и т. д. используется динамическая голограмма, образованная наложением волновых полей, излучаемых синапсами нейронов. Коллега Б. Турухано также считает, что летучие мыши и дельфины для распознавания мелких препятствий синтезируют необходимую апертуру с помощью внутренней динамической голограммы.
4. Похоже, что торсионные поля могут являться той силой, которая динамично связывает все уровни Мироздания, обеспечивая «Голодвижение», которое по Д. Бому является основной Реальностью окружающего нас мира. Основной порядок этого движения – свёртывание и развёртывание. Порядок мира, как структуры вещей, называется развёрнутым или явным порядком и возникает он из более глубокого, скрытого порядка организации Вселенной. Ну а управляет всем этим процессом такая тонкая материя, как Сознание, причём Сознание Человека является элементом (фракталом) общего вселенского Сознания.
5. «Тонкие явления» в фотографическом процессе, в частности, можно объяснить свойствами торсионных полей. Хочу обратить ваше внимание, что в основе процесса получения обычной фотографии, Липпмановской фотографии и голограммы лежит единый этап (или общий порядок) формирования скрытого изображения. Похоже, что скрытое изображение в свёрнутом виде содержит информацию обо всех возможных вариантах отображения объекта. Торсионные поля, согласно их исследователям Акимову и Шипову, сопутствуют любому электромагнитному излучению, в том числе и световым волнам. Эти авторы полагают, что при формировании скрытого изображения записывается торсионная голограмма объекта, содержащая полную информацию об объекте, в том

числе о его временных, пространственных, и структурных характеристиках. Часть этой информации используется при развёртывании её в фотографию или в голограмму. Записью торсионной голограммы они объясняют тот факт, что экстрасенсы по фотографии или даже её части, видят объёмное изображение человека и его местонахождение. Похоже, что в качестве опорного пучка выступает первичное торсионное поле Вселенной.

6. И, наконец, о двух вещах, с которыми мы постоянно контактируем в жизни, но не осознаём их важными элементами той же Бомовской Голодинамики. Я имею ввиду Зеркало как физический объект и воду, как материальную субстанцию. Первое являет собой пример динамического отражения нашей Реальности, вторая принимает, хранит и передает имплицитную информацию, являясь одним из примеров голографической памяти Вселенной. И в том, и в другом случае – постоянное развёртывание и свёртывание окружающего нас мира. И, может быть, обратив свои взоры к этим двум объектам научных исследований с голографических позиций, нам в ближайшем будущем будет легче сместить собственную «точку сборки» и осознать существование других миров, параллельных привычному. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Бом Д., Квантовая теория, Физматгиз, М., 1961 г.
2. Гейзенберг В., Физика и философия, М., Наука, 1989, с. 3-132.
3. Денисюк Ю.Н. Принципы голографии. Л.: ГОИ, 1978.
4. Прибрам К. Языки мозга. М.: «Прогресс», 1975.
5. Талбот М. Голографическая Вселенная. М.: София, 2004.
6. Югай Г. Голография вселенной и новая универсальная философия. М.: Крафт+, 2007.
7. Фактор Д. Развертывающееся значение. Три дня диалогов с Девидом Бомом. Пер. с английского М. Немцова.
8. Демидов В. Как мы видим то, что видим. М.: Знание, 1979.
9. Тихоплав В. Ю., Тихоплав Т. С. Новая физика веры. СПб.: Крылов, 2007.
10. Всесоюзный семинар «Юрий Николаевич Денисюк – основоположник отечественной голографии» (сборник трудов). ИТЦ СПб. ГУ ИТМО, 2007г.
11. Ванин В. А. Изобразительная голография: ретроспективный обзор и прогноз // Мир техники кино, 2007, № 4, с. 17-22.
12. Ванин В. А. Голографическая Парадигма Мира // Мир техники кино, 2007, №6, с. 15-19.
13. Масару Эмото, Послания воды. Тайные коды кристаллов льда. М.: София, 2006.
14. Карлос Кастанеда, Лекции и интервью. М.: София, 2006.
15. Акимов А. Е. Облик физики и технологий в начале XXI века, М.: Шарк, 1999.



МЕТОДЫ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССОРЫ для контроля подлинности защитных голограмм с кодированными скрытыми изображениями

С. Б. Одинокоев, к.т.н.,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

■ Защита от массовой подделки материальных объектов является одной из серьёзных проблем, стоящих перед мировой экономикой и государственными организациями разных стран. Материальный и моральный ущерб, который причиняют подделки производственным, торговым и финансовым предприятиям всего мира, огромен. От подделки страдают 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.), аудио-видеопродукция и программное обеспечение, кредитные карты и т. п.

В настоящее время традиционные полиграфические элементы защиты (ЭЗ) не могут успешно противостоять копированию и имитации. Альтернативным видом полиграфических ЭЗ являются защитные голограммы, обладающие уникальными свойствами, присущими данному способу записи информации.

Применяемые в настоящее время защитные голограммы (ЗГ) включают в себя скрытые изображения, идентификация которых возможна только оптико-электронными средствами.

Основными видами скрытых изображений являются:

- микротекст или микроизображения, которые контролируются визуально при использовании увеличивающей оптики [1],
- изображения, записанные на ЗГ в когерентном свете, наблюдение которых, соответственно, возможно тоже только в когерентном свете [2],
- изображения, записанные на ЗГ с помощью искажённых волновых фронтов либо в канале опорного луча, либо в канале объектного луча с помощью диффузных рассеивателей света или специальных масок [3–7].

Главным недостатком первых и вторых является простота их обнаружения при использовании простейших приборов (микроскоп, линзовый растр, лазер). Третий вид скрытых изображений лишён этого недостатка и обеспечивает высокую степень скрытности записанного

изображения, однако для восстановления таких изображений необходимо применять точную копию кодирующей маски, которую получить трудно или практически невозможно, как, например, в случае применения диффузных рассеивателей.

Таким образом, для всех рассмотренных видов скрытых изображений характерно использование неизменяемых кодирующих элементов (объективы, линзовые растры, диффузные рассеиватели, фазовые маски). Это вносит значительные трудности при применении этих методов на практике, такие как необходимость наличия широкого набора кодирующих масок или использование уникальных оптических элементов. Соответственно, решением этих проблем является использование в качестве кодирующей маски динамического изменяемого элемента, например, акусто-оптического кристалла или жидкокристаллического модулятора света.

В любом случае, на принятие окончательного решения о подлинности ЗГ влияют параметры самой голограммы, условия наблюдения и способности наблюдателя к восприятию и интерпретации полученной информации. Автоматизация этого процесса не только позволит избавиться от влияния указанных субъективных факторов, но и повысит степень защиты ЗГ от подделки.

Целью данной работы является разработка функциональной и оптической схем оптико-электронного матричного процессора для идентификации и контроля подлинности защитных голограмм с кодированием-декодированием скрытых изображений с помощью жидкокристаллического модулятора света в оптической схеме записи-восстановления скрытых изображений и с элементами компьютерной криптографической обработки скрытых изображений в электронном блоке.

1. Анализ алгоритмов работы приборов ОПЗГ

Принцип определения подлинности объекта в общем случае заключается в извлечении присущей ему индивидуальной информации в виде скрытого изображения и сравнении её с эталоном. При идентичности считанной с объекта и эталонной информации объект считается подлинным, в противном случае – поддельным. Исходная

анализируемая информация, как правило, должна быть предварительно записана на объект (носитель), сохранена в нём в течение длительного промежутка времени с возможно меньшими потерями и воспроизведена для сравнения.

Таким образом, можно выделить основные этапы процесса определения подлинности ЭЗ:

- 1) формирование и запись исходной информации в виде скрытого изображения;
- 2) хранение записанной информации;
- 3) считывание записанной информации в виде скрытого изображения;
- 4) сравнение считанной и эталонной информации и вынесение решения об их соответствии.

Рассматривая ЗГ на этапах 1-3 не только как носитель информации, но и как канал передачи информации через пространство и время с помехами, можно описать его в терминах теории связи.

Основной задачей, которая обычно возникает при передаче информации по каналу связи, является вынесение суждения о структуре и свойствах входного сигнала по определённым характеристикам выходного сигнала. Используемая при этом операция кодирования информации преследует три цели:

- преобразование информации в вид, при котором может быть утрачена преимущественно та её часть, которая не представляет интереса при решении основной задачи передачи информации;
- приспособление формы (в т. ч. физической природы) сигнала к используемому каналу связи;
- сокрытие передаваемой информации от несанкционированного использования.

Следовательно, необходимо закодировать исходную информацию, осуществить её хранение, считывание и декодирование.

В приборах идентификации ЗГ информация проходит, по крайней мере, по двум каналам – эталонному и объектному (количество и тех и других может быть увеличено для повышения избыточности передачи). Базовым звеном объектного канала является ЭЗ. Эталонная информация может быть передана различными путями.

Эталон может храниться непосредственно в приборе. При этом он либо представляет собой физический аналог ЭЗ, либо формируется в момент сравнения из информации, записанной в какой-либо другой форме. При этом эталонная информация может оставаться полностью закрытой от пользователя. Этот способ требует постоянного хранения всех эталонов, которые могут потребоваться для осуществления сравнения.

Другой способ состоит в передаче эталонной информации через канал, включающий оператора. В этом случае оператор должен ввести её в прибор непосредственно перед моментом опре-

деления подлинности ЭЗ. При этом нет необходимости постоянно хранить эталонную информацию в приборе, однако должно быть обеспечено ее перекодирование для приведения в форму, удобную для сравнения.

Без учёта процессов кодирования-передачи-декодирования задача определения подлинности состоит в сравнении объектной и эталонной информации, т. е. сводится к типичной операции распознавания.

Структурная схема устройства идентификации ЗГ с точки зрения разделения на конструктивные элементы показана на рис. 1.

2. Анализ методов обработки оптической информации, применяемых в приборах идентификации подлинности ЗГ

Все устройства, входящие в канал кодирования-передачи-декодирования должны оптимальным образом выполнять следующие функции:

- преобразование формы поступающей информации, таким образом, чтобы она наилучшим образом соответствовала бы возможностям передачи через последующее звено без потерь и искажений;
- защита информации от несанкционированного доступа, изменения и копирования (шифрование).

Как было отмечено выше, способ передачи информации в виде защитной голограммы является достаточно эффективным при решении задачи её преобразования и повышения устойчивости к случайным и преднамеренным искажениям. Голографическая запись по своей сути уже является операцией кодирования оптического сигнала, удачно сочетая надёжность и простоту. Однако специфика применения приборов ОПЗГ может потребовать увеличения криптостойкости используемого метода кодирования.

Существуют два основных пути повышения степени защищённости информации, которая регистрируется и воспроизводится голографическим методом:

- кодирование опорного пучка;
- кодирование изображения.

Идея метода голограмм с кодированным опорным пучком состоит в том, что при получении голограммы точечного источника по схеме Френеля плоский волновой фронт искажается кодовой фазовой маской. При восстановлении голограммы излучением, проходящим через ту же кодовую маску, изображение точечного ис-



Рис. 1. Структурная схема опико-электронного устройства идентификации ЗГ с точки зрения разделения на конструктивные элементы.

точника возникает в том же месте, где оно было при записи, и может быть зарегистрировано с помощью фотоприёмного устройства или визуально. При отсутствии кодовой маски или её отличии от той, что была использована при записи, изображение точечного источника не восстанавливается.

Исследования показывают, что эффективность метода наиболее высока тогда, когда фазовые искажения, вносимые кодирующим элементом, достаточно велики. Использование случайного диффузного рассеивателя с этой точки зрения является оптимальным. Однако, если функция фазового кода не будет достаточно медленно меняться в любом направлении вдоль плоскости маски, необходимость исключительно точной юстировки положения тестируемой карты может привести к значительным сложностям в реализации.

Сдвиг кодирующей маски относительно исходного положения на величину, соизмеримую с размером элементарного фазоискажающего участка, будет приводить к исчезновению восстановленного с голограммы изображения. Указанный недостаток настолько серьёзен, что ставит под сомнение практическую применимость описанного метода.

Метод кодирования изображения состоит с тем, что кодирование двумерного образа осуществляется путём его умножения на случайную фазовую функцию с равномерным распределением, после чего проводится запись полученного волнового фронта на голограмму. При восстановлении для получения действительного изображения необходимо осветить голограмму волной, комплексно сопряжённой опорной волне. Восстановленный с голограммы волновой фронт пропускается через ту же, что и при записи фазовую кодовую маску, восстанавливая исходное изображение.

Данный метод требует использования обязательно только фазовой кодовой маски. Кодовая маска должна быть отделена от кодируемого изображения слоем пространства, при не выполнении этого условия, т.е. если кодовая маска и кодируемое изображение будут находиться рядом в геометрическом приближении, кодирование изображения не происходит.

Голографическая запись информации так же обладает повышенной стойкостью к потере данных, т.к. информация о каждой точке объекта распределяется по всей площади голограммы и при потере некоторой части площади голограммы не приводит к потере информации во всём исходном изображении, а только к ухудшению качества восстановленного изображения (не восстановление мелких деталей, возникновение зернистой структуры).

Дополнительное кодирование информации ЭЗ связано с алгоритмами обработки скрытых изображений восстановленных с ЗГ, т.е. работа с отдельными участками восстановленного изображения.

Некоторые варианты алгоритмов обработки восстановленных кодированных изображений рассмотрены в следующей части данной работы.

3. Применение для кодирования и декодирования оптико-электронного векторно-матричного умножителя

3.1. Представление операции перемножения оптических сигналов как их свёртки

Для обеспечения условий стыковки оптических элементов изображения с электронными схемами скрытые изображения ЗГ, как правило, представляют собой двоичные двумерные структуры (плоские изображения, состоящие из светлых и тёмных однотипных элементов простой формы). Таким образом, их можно рассматривать как векторы или матрицы, состоящие из чисел в двоичной форме, а обработку таких изображений, как математические операции над векторами и матрицами. Например, если свет с интенсивностью I_1 проходит через модулятор с коэффициентом пропускания t_1 , результирующая интенсивность света I_2 равна $I_1 t_1$, что эквивалентно умножению чисел I_1 и t_1 .

Одним из возможных вариантов обработки изображения (двоичной матрицы или вектора), восстановленного с ЗГ, является его перемножение на пространственном модуляторе света (ПМС) с матрицей или вектором и последующего сравнения полученного результата с эталоном. Существуют несколько базовых вариантов алгоритма такого оптического векторно-матричного умножения, имеющих общее название «алгоритмы цифрового умножения с помощью вычисления аналоговой свёртки» (ЦУАС) [8].

Умножение двух чисел эквивалентно выполнению свёртки над их цифровыми представлениями в том случае, если результат свёртки интерпретируется в смешанном формате, в котором для основания числа b отдельные цифры могут иметь величины, большие чем b . В общем, если необходимо умножить по основанию b два N -разрядных числа, представленных в виде

$$x = \sum_{n=1}^N x_n b^{n-1}, \quad y = \sum_{m=1}^N y_m b^{m-1},$$

где x_n и y_n – отдельные цифры, то результат выглядит так:

$$xy = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N x_n y_m b^{(n+m-1)} = \sum_{k=1}^{2N-1} \left(\sum_{n=1}^k x_n y_{k-n+1} \right) b^{k-1},$$

где $k = n + m - 1$.

Рассмотрим цифры в числах x и y , представляющие собой две функции, которые следует перемножить. Для выполнения свёртки запишем цифры числа y в обратном порядке и разместим их после цифр числа x . Первым значением свёртки является $x_1 y_1$, вторым $x_1 y_2 + x_2 y_1$ и т. д. до $x_N y_N$; k -е значение свёртки равно

$$\sum_{n=1}^k x_n y_{k-n+1},$$

что в точности является k -й цифрой произведения xy .

Имеются два способа выполнения операций свёртки в оптике: свёртка в области пространственных частот и во временной области.

3.2. Операция свёртки оптических сигналов в области пространственных частот

Как известно, свёртка двух функций может быть представлена как обратное Фурье-преобразование произведения Фурье-образов этих функций, т. е.

$$f_1(t) \otimes f_2(t) = F^{-1}\{F\{f_1(t)\} \cdot F\{f_2(t)\}\},$$

следовательно, выполнение свёртки может происходить в Фурье-плоскости объектива.

Преобразование Фурье одной функции осуществляется линзой, а преобразование Фурье второй функции зарегистрировано в голограмме. Для осуществления свёртки выполняется Фурье-преобразование результата произведения Фурье-образов с помощью второй линзы. При этом результат свёртки двоичных функций является функцией смешанного формата. Использование не обратного, а прямого преобразования Фурье, как известно, приведёт только к необходимости изменения направления осей координат в плоскости восстановленного изображения для правильной трактовки результата.

Например, рассмотрим случай умножения $5 \times 7 = 35$, что в двоичной записи выглядит так: $101 \times 111 = 10001$ (вид результата произведения в смешанном формате имеет вид 11211). Входные сигналы могут быть представлены в виде суммы дельта функций $\delta(X - X_0)$ (двоичные единицы), разнесённых между собой на расстояния $n \times \alpha$, где n – номер разряда. Что не совсем корректно, т. к. любой реальный источник имеет конечную ширину, но для наглядности его шириной пренебрегаем. Учёт ширины источника приведёт к некоторому размытию конечной картины. Таким образом, входные сигналы имеют вид:

$$101 \rightarrow \delta(X) + \delta(X - 2\alpha) \xrightarrow{F} 1 + e^{-i2\pi v 2\alpha}$$

$$111 \rightarrow \delta(X) + \delta(X - \alpha) + \delta(X - 2\alpha) \xrightarrow{F} 1 + e^{-i2\pi v \alpha} + e^{-i2\pi v 2\alpha}$$

где v – пространственная частота, равная $X/\lambda f$ для линзы с фокусным расстоянием f и рабочей длиной волны излучения λ .

Перемножая два выражения, получаем:

$$(1 + e^{-i2\pi v \alpha})(1 + e^{-i2\pi v \alpha} + e^{-i2\pi v 2\alpha}) = \\ = 1 + e^{-i2\pi v (\alpha)} + e^{-i2\pi v (2\alpha)} + e^{-i2\pi v (3\alpha)} + e^{-i2\pi v (4\alpha)}$$

Проводя обратное преобразование Фурье, имеем результат свёртки в виде:

$$1 + e^{-i2\pi v (\alpha)} + e^{-i2\pi v (2\alpha)} + e^{-i2\pi v (3\alpha)} + e^{-i2\pi v (4\alpha)} \xrightarrow{F^{-1}} \\ \rightarrow \delta(X) + \delta(X - \alpha) + 2\delta(X - 2\alpha) + \delta(X - 3\alpha) + \delta(X - 4\alpha)$$

Полученный результат соответствует выходной функции 11211, как и следовало ожидать. Следует отметить, что количество разрядов в результате перемножения равно $2k-1$, где k – число разрядов в перемножаемых числах, а максимальное значение сигнала при перемножении двух k разрядных чисел равно k .

Интерпретируя матрицу из нулей и единиц как вектор из чисел двоичного формата, рассмотренную частотную свёртку можно применить для осуществления операции векторно-матричного перемножения.

Достоинствами алгоритма являются простота выполнения процедуры ЦУАС и статичность во времени одной из входных функций (Фурье-голограмма).

3.3. Операция свёртки оптических сигналов во временной области

В данном алгоритме свёртка вычисляется путём поддержания преобразованной функции одного из входных сигналов (функция с обратной зависимостью от времени) в постоянном виде, а вторая функция изменяется относительно неё. Их произведение во всех точках образует свёртку.

Временная свёртка может быть организована двумя видами схем:

- 1) с пространственным интегрированием;
- 2) с временным интегрированием.

По первой схеме оба входных сигнала являются пространственно изменяющимися функциями, а устройство реализации алгоритма, сдвигая один сигнал относительно другого, на каждом шаге суммирует произведения сигналов во всех точках пространства. Таким образом, если функция $g(x)$ поддерживается постоянной во времени, а вторая функция $h(t)$ сдвигается относительно неё, то временную зависимость $f(t)$ на выходе из устройства, осуществляющего свёртку, можно представить в виде:

$$f(t) = \int g(x)h(vt - x)dx,$$

где v – скорость сдвига функции $h(t)$ относительно $g(x)$.

По второй схеме функция $g(t)$ подаётся на устройство свёртки в качестве зависящего от времени сигнала и равномерно засвечивает все ячейки. Вторая функция с обратной зависимостью сигнала от времени, $h(-t)$, сдвигается относительно неё по пространству (ячейкам). Результат свёртки снимается с устройства, как пространственная зависимость значений сумм по времени произведений сигналов в каждой ячейке, т. е. результирующий сигнал $f(x)$ равен:

$$f(x) = \int g(t)h(x/v - t) dt,$$

где v – скорость сдвига функции $h(-t)$ по ячейкам.

Использование второй схемы реализации временной свёртки в устройствах, где один из входных сигналов записан на голограмму, ограничено из-за необходимости получения обоих входных сигналов как временных зависимостей.

К достоинствам временной свёртки можно отнести удобство её использования в векторно-матричном умножении при увеличении числа входных сигналов, а также широкую и отработанную элементную базу её реализации.

4. Варианты оптических схем устройства ОПЗГ

4.1. Устройство реализации свертки в области пространственных частот

Для реализации устройства со свёрткой сигналов в области пространственных частот можно предложить схему, представленную на рис. 2.

Коллимированный лазерный пучок от полупроводникового лазера, проходя через жидкокристаллическую матрицу (ЖК-модулятор), на которой создаётся пространственное распределение коэффициента пропускания (прозрачные и непрозрачные зоны), задаёт первую входную функцию. На голограмме зарегистрирован Фурье-спектр второй функции (аналогичный первой).

Через Фурье-преобразующий объектив № 1 (ФПО № 1) на голограмме создаётся Фурье-образ первого входного сигнала. Волна, восстановленная при этом с голограммы, представляет собой произведение Фурье-образов входных функций. Фурье-преобразующий объектив № 2 (ФПО № 2) производит второе Фурье-преобразование и создаёт на ПЗС-матрице изображение, соответствующее свёртке входных сигналов в смешанном формате.

Голограмма разлагает восстанавливающий пучок на дифракционные пучки 0, ± 1 , ± 2 и т. д. порядков. Нулевой порядок представляет собой несколько размытое из-за дифракции изображение ЖК-модулятора. Пучки первого порядка являются свёрткой и корреляцией входных сигналов. Пучки высших порядков содержат намного меньше энергии, чем пучки 0, ± 1 , являются вредными и представляют собой сложные комбинации произведений входных сигналов.

Из выше сказанного следует, что приёмник нужно располагать таким образом, чтобы на него попадал только один из пучков первого порядка, и стремиться при записи голограммы и восстановлении с неё изображения к увеличению энергии в пучках первого порядка и уменьшению её в других.

Устройство с временной свёрткой обладает рядом преимуществ над другими схемами:

- простота реализации векторно-матричного перемножения оптических сигналов;
- простота конструкции, так как используется свойство линз выполнять Фурье-преобразование над сигналами;

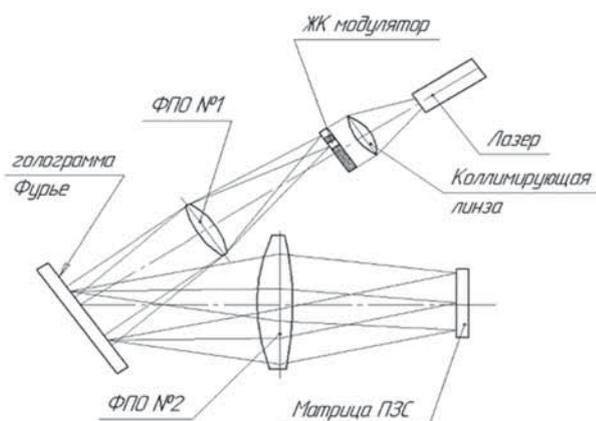


Рис. 2. Схема устройства со свёрткой сигналов в области пространственных частот

- использование Фурье-преобразующих объективов, параметры которых (фокусные расстояния, относительные отверстия) значительно влияют на сигналы и, следовательно, являются дополнительной защитой от несанкционированного копирования защитной голограммы.

К недостаткам данной схемы можно отнести низкую энергетику, т.е. необходимость использования достаточно мощного источника излучения, а также сложности в позиционировании голограммы для правильной работы прибора, т.к. Фурье-спектры сигналов (в общем случае) имеют достаточно тонкие не осесимметричные структуры.

4.2. Устройство реализации свёртки во временной области

Возможная схема данного устройства представлена на рис. 3.

С помощью лазерного излучения с голограммы восстанавливается предметная волна (на голограмме записано изображение матрицы из светлых и тёмных точек) – первая входная функция. Первый проекционный объектив переносит восстановленное изображение на ЖК-матрицу, на которой создаётся пространственное распределение коэффициента пропускания (прозрачные и непрозрачные области), переменное во времени и соответствующее второй входной функции. Картина, получившаяся на второй (по ходу излучения) подложке ЖК-матрицы, соответствует перемножению элементов первой функции с элементами второй. Второй проекционный объектив переносит эту картину на ПЗС-матрицу и согласует их размеры. Сложение перемноженных элементов входных функций осуществляется в электронном виде с сигналами, снятыми с ПЗС-матрицы, по определённому алгоритму.

К достоинствам этой схемы можно отнести более низкие требования по позиционированию голограммы.

Из анализа поставленной задачи и предложенных вариантов реализации проектируемого устройства выбрана схема со свёрткой в области пространственных частот, как обладающая рядом значительных преимуществ (высокая скорость и простота реализации свёртки с использованием Фурье-преобразующих объективов).

5. Анализ функционирования устройства идентификатора ЗГ

Для получения ЗГ со скрытым изображением используется схема получения Фурье-голограммы. Скрытым изображением является Фурье-спектр транспаранта ($\tau_{об}(x,y)$), полученный с помощью Фурье-преобразующего объектива (ФПО). Транспарант $\tau_{об}(x,y)$ представляет собой клетчатое поле из элементов 0.1×0.1 мм размера $1,8 \times 1,4$ мм (18×14 элементов), каждый второй элемент не рабочий (коэффициент пропускания $\tau_{об}=0$), остальные ячейки могут иметь коэффициент пропускания $\tau_{об}$ равный 0 или 1, в зависимости от выбранной входной функции.

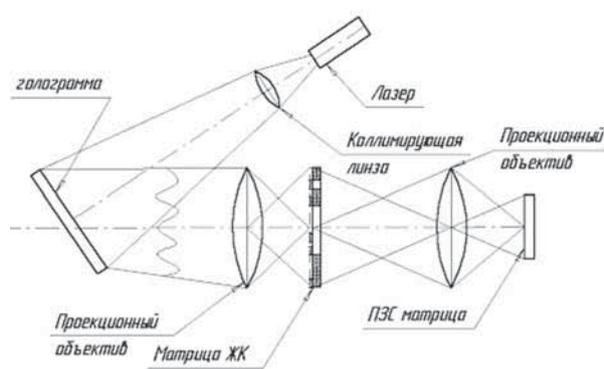


Рис. 3. Схема устройства с временной свёрткой двух входных функций

$$\text{а) } [A]_{7 \times 1} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{i1} \\ \vdots \\ a_{71} \end{bmatrix} \quad \text{где } \forall i \in 1 \div 9:$$

$$a_{i1} = \overbrace{0(1) \ 1(0) \ \dots \ 0(1)}^9$$

{0(1) – ноль или единица}

$$\text{б) } [B]_{7 \times 7} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1j} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2j} & \dots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & b_{ij} & \dots & b_{i7} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ b_{71} & b_{72} & \dots & b_{7j} & \dots & b_{77} \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \forall j \in 1 \div 7, \ i \in 1 \div 7: \ b_{ij} = \overbrace{0(1) \ 1(0) \ \dots \ 0(1)}^9$$

$$\text{в) } ([B]_{7 \times 1})_i = \begin{bmatrix} b_{i7} \\ \vdots \\ b_{ij} \\ \vdots \\ b_{i2} \\ b_{i1} \end{bmatrix}$$

Рис. 4. Входные матрицы для голограммы (а) и ЖК-матрицы (б); вектор, выводимый одновременно на ЖК-матрицу (в)

Таким образом, входной функцией является матрица, состоящая из 0 и 1, размером 7x9. В дальнейших выкладках данная матрица будет рассматриваться как вектор-столбец [A] размером 7x1, состоящий из 9 разрядных чисел в двоичном формате (см. рис. 4).

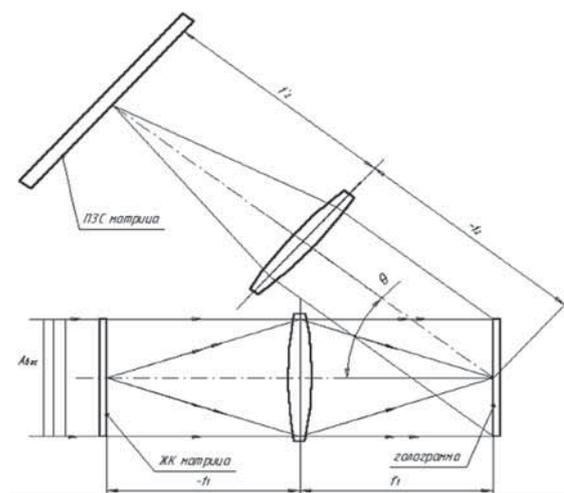


Рис. 5. Восстановление скрытого изображения с ЗГ по схеме Фурье-голограммы

Предполагается, что проектируемое устройство будет работать с голограммами, полученными штампованием металлической фольги матрицей, снятой с «мастер»-голограммы. При этом дифракционная эффективность голограмм будет составлять не менее 20%.

Восстановление и декодирование скрытого изображения с ЗГ будет осуществляться устройством по схеме восстановления фурье-голограмм (рис. 5).

Изображение, выводимое на ЖК-матрицу, подобно транспаранту, использовавшемуся при получении голограммы (размеры поля и элементов такие же, как и на транспаранте). Входная функция в данном случае является матрицей [B] размером 7x7, состоящей из 9 разрядных чисел в двоичном формате. При этом последовательно в процессе идентификации ЗГ на ЖК-матрицу выводится транспонированные строки этой входной матрицы с элементами, взятыми в обратном порядке (см. рис. 4).

На ФПЗС-матрице регистрируется освещённость, численно равная свёртке функции, записанной на голограмме, и функции, выведенной на ЖК-матрицу. Размеры элемента изображения на ПЗС и на ЖК соотносятся как фокусные расстояния первого и второго Фурье-преобразующих объективов. Разрядность чисел на ПЗС равна 2x n-1, где n – разрядность входного сигнала (максимальная), т. е. 17. Требуемый динамический диапазон ПЗС не менее 17 дБ. При аналого-цифровом преобразовании считанного с ПЗС сигнала его можно трактовать как произведение чисел в двоичном формате, полученное в смешанном формате (без переноса единиц между разрядами).

После Фурье-преобразования восстановленного волнового фронта на приёмнике, количество элементов которого должно быть не менее 34, регистрируется 7-ая строка полученного вектора, которая соответствует скалярному произведению «вектора голограммы» и «вектора ЖК матрицы» (рис. 6).

$$\begin{bmatrix} b_{i7} \\ \vdots \\ b_{ij} \\ \vdots \\ b_{i2} \\ b_{i1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ \vdots \\ a_{1j} \\ \vdots \\ a_{17} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}b_{i7} & 0 & 0 & 0 \\ a_{12}b_{i7} & a_{11}b_{i6} & \vdots & 0 \\ \vdots & a_{12}b_{i6} & 0 & \vdots \\ a_{16}b_{i7} & \vdots & a_{11}b_{i2} & 0 \\ a_{17}b_{i7} & a_{16}b_{i6} & a_{12}b_{i2} & a_{11}b_{i1} \\ 0 & + a_{17}b_{i6} + \dots + a_{13}b_{i2} + a_{12}b_{i1} \\ 0 & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & a_{15}b_{i2} & a_{14}b_{i1} \\ 0 & 0 & a_{16}b_{i2} & a_{15}b_{i1} \\ 0 & 0 & a_{17}b_{i2} & a_{16}b_{i1} \\ 0 & 0 & 0 & a_{17}b_{i1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}b_{i7} \\ a_{12}b_{i7} + a_{11}b_{i6} \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{17}b_{i7} + a_{16}b_{i6} + a_{15}b_{i5} + \dots + a_{12}b_{i2} + a_{11}b_{i1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{17}b_{i2} + a_{16}b_{i1} \\ a_{17}b_{i1} \end{bmatrix}$$

Рис. 6. Скалярное произведение «вектора голограммы» и «вектора ЖК-матрицы»

7-ая строка:

$$\Rightarrow a_{17}b_{i7} + a_{16}b_{i6} + \dots + a_{12}b_{i2} + a_{11}b_{i1} = [A]_{7 \times 1} \cdot ([B]_{7 \times 1})_i$$

После регистрации на ПЗС и передачи сигнала в электронный блок на ЖК выводится следующий вектор из входной матрицы ЖК-модулятора.

В результате после 7 прогонов в электронный блок будет передан сигнал, соответствующий скалярному произведению «входного вектора голограммы» и «входной матрицы ЖК-модулятора».

Таким образом, из выше изложенных выкладок следует, что на матрице ФПЗС действительно получится двумерная свёртка двух сигналов, причём полученное изображение несколько размыто из-за свёртки с функцией входного зрачка первого Фурье-преобразующего объектива. При считывании с матрицы ФПЗС определённых строк в электронный блок обработки сигнала (компьютер), считанный сигнал будет пропорционален осве-

щённости, созданной в плоскости ФПЗС, т.е. квадрату амплитуды волны.

Это должно учитываться программным обеспечением для дополнительной криптографической обработки полученного сигнала, которая может проводиться по какому-либо криптографическому алгоритму.

Результаты и выводы

Для выбранной оптической схемы устройства получения Фурье-голограммы были проведены габаритный, светознергетический и абберационные расчёты, подтвердившие возможность создания оптико-электронного векторно-матричного процессора на существующей элементной базе. Направлениями дальнейших исследований являются анализ влияния ошибок позиционирования ЗГ при идентификации и их устранение, выбор криптографического алгоритма и разработка программного обеспечения для криптографической обработки. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Гальперн А. Д. Голографическое устройство для воспроизведения кодирующих элементов. Патент Российской Федерации № 2110411 от 10.05.98.
2. John E. Wreede et al. Encoded hologram for producing a machine readable and a human readable image, Patent USA No 5, 499, 116 of Mar. 12, 1996.
3. 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.
4. 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.
5. Refregier P., Javidi B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding. Opt. Lett. 1995. V. 20, p. 767-769.
6. Songcan Lai. Security holograms using an encoded reference wave, Optical Engineering. V. 35. No 9, September 1996.
7. Бобринев В. И., Гуланын Э. Х. Голограммы с протяжённым опорным источником. Квантовая электроника, 1971, вып. 4.
8. Аппатуна Р. Оптические вычисления. М. Мир, 1993.



А. М. Настас,
А. М. Андриеш,
В. В. Бивол,
А. М. Присакар,
И. Н. Слепнев,
Г. М. Тридох
Центр Оптоэлектроники
Института прикладной
физики Академии наук
Молдовы

РЕГИСТРИРУЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

на базе халькогенидных стеклообразных полупроводников для голографии



В работе рассмотрены процессы образования голографических дифракционных решёток и интерферограмм в структурах металл – халькогенидный стеклообразный полупроводник и металл – халькогенидный стеклообразный полупроводник-термопластик при их зарядке в поле коронного разряда. Использование коронного разряда на стадии записи голографических решёток на основе фотоструктурных превращений в структуре металл – халькогенидный стеклообразный полупроводник позволяет увеличить светочувствительность халькогенидных стеклообразных полупроводников и дифракционную эффективность, а также увеличить регулярность и глубину селективно протравленных структур. В структуре металл – халькогенидный стеклообразный полупроводник-термопластик проявление скрытого эталонного изображения, хранящегося в халькогенидном стеклообразном полупроводнике на термопластическом слое, позволяет производить его интерференционное сравнение со следующими голографическими изображениями, регистрируемыми в реверсивном фототермопластическом режиме на поверхности термопластического слоя.

■ 1. ВВЕДЕНИЕ

Запись оптической информации в халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП) производится на основе процессов фотоструктурных превращений, фотостимулированной электродиффузии металлов или фотокристаллизации. Плёнки ХСП составляют основу класса неорганических фоторезистов, принцип действия которых основан на фотоструктурных превращениях (ФСП) [1]. При фотоструктурных превращениях наблюдаются относительно невысокие значения голографической чувствительности S ($10^{-1} - 10^1$) Дж/см² и сравнительно низкие значения дифракционной эффективности ($h \sim 10^{-2}$) [1]. Традиционная методика регистрации интерферограмм фототермопластическим носителем (металл – ХСП-термопластик) [2] довольно громоздка и не всегда может быть использована.

Целью данной работы являлось исследование процессов образования голографических дифракционных решёток и интерферограмм на основе ФСП в структурах металл – ХСП и металл – ХСП-термопластик при их зарядке в поле коронного разряда.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1 Структуры металл – ХСП

Металлизация основы и нанесение ХСП слоя осуществлялись методом последовательного термического напыления в вакууме. В качестве халькогенидных стеклообразных полупроводников были использованы тонкоплёночные слои As_2S_3 и твёрдых растворов системы $(As_2S_3)_x(As_2Se_3)_{1-x}$. Использование коронного разряда на стадии записи голографических решёток в структуре металл – халькогенидный стеклообразный полупроводник на основе фотоструктурных превращений позволяет увеличить светочувствительность халькогенидных стеклообразных полупроводников и дифракционную эффективность (рис.1 а), расширить динамический диапазон (рис.1 б).

Селективное химическое травление плоских дифракционных решёток, сформированных в этих полупроводниковых слоях в присутствии коронного разряда приводит к увеличению степени регулярности протравленных рельефно-фазовых голографических дифракционных решёток, увеличению глубины рельефа на 25-30% (рис. 2) и дифракционной эффективности на 30-50%. Качественное объяснение наблюдаемых явлений приведено в работе [4].

2.2 Структуры металл – ХСП-термопластик

Термопластический слой наносился кюветно-менисковым методом на структуры металл – ХСП по упомянутому выше методу. Толщина слоёв данного многослойного ФТПН была равна $\approx 10^{-2}$ мкм, 2 мкм и 0,8 мкм соответственно. Запись волновых фронтов осуществлялась двухслойным фототермопластическим носителем в оптическом голографическом интерферометре-корреля-

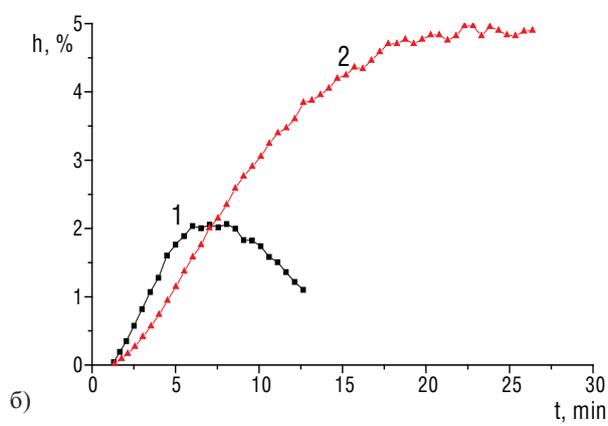
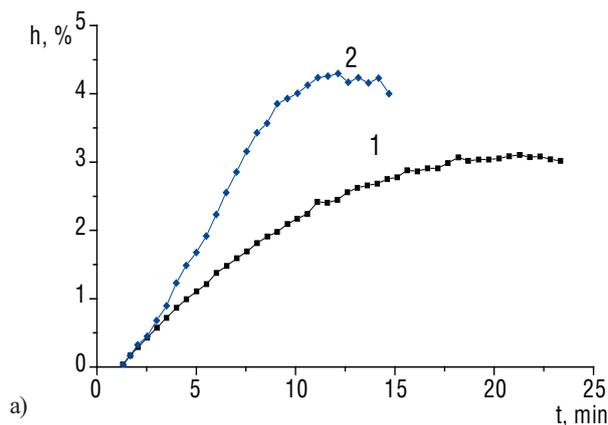


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности от времени записи (а) – структурой As_2S_3-Ni и гетероструктурой – As_2S_3/As_2Se_3 – (б). Кривые 2 и 1 соответствуют процессу регистрации решёток в поле коронного разряда и без него, соответственно

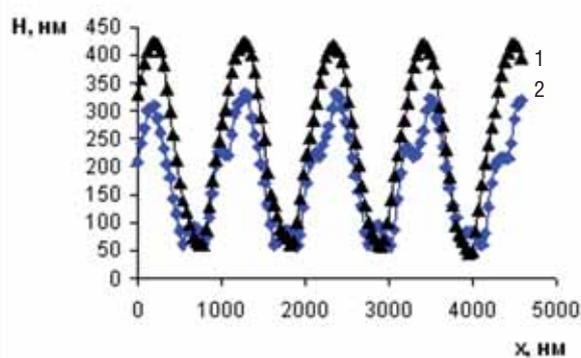


Рис. 2. Форма профиля голографических дифракционных решёток. Кривые 2 и 1 соответствуют процессу регистрации решёток в поле коронного разряда и без него, соответственно

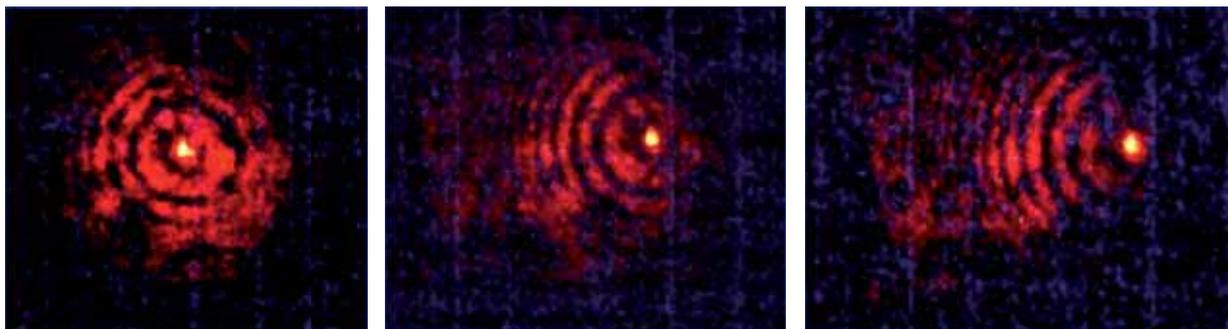


Рис. 3. «Кольца Ньютона»

торе с частотной плоскостью в когерентном излучении гелий-неонового лазера на установке УИГ-22К. В предметном плече интерферометра использовали плоский или сферический волновой фронт, а в опорном плече – плоский. Выбор этих волновых фронтов был обусловлен простотой их получения и интерпретации, как зарегистрированного, так и реконструированного изображения.

Показана возможность записи изображения первоначального состояния объекта методом фотоиндуцированных изменений в халькогенидном стеклообразном полупроводнике фототермопластического носителя, а последующие изображения регистрируются в реверсивном, каждое отдельно, фототермопластическом режиме на поверхности термопластического слоя. При этом происходит проявление на термопластический слой скрытого изображения, хранящегося в халькогенидном стеклообразном полупроводнике [5]. Проявление скрытого эталонного изображения, хранящегося в халькогенидном стеклообразном полупроводнике на термопластическом слое, позволяет производить его интерференционное сравнение со следующими голографическими изображениями, регистрируемыми в реверсивном фототермопластическом режиме на поверхности термопластического слоя.

Плоский волновой фронт регистрировался в ХСП слое на основе ФСП, а сферический

в режиме фототермопластической записи. В результате регистрации этих двух волновых фронтов структурой металл – ХСП-термопластик в голографическом форма-

те на поверхности термопластического слоя образуется зонная пластинка и решётка. При восстановлении интерферограммы в результате интерференции реконструированных плоского и сферического волнового фронта образуются «Кольца Ньютона» (рис. 3).

После термического стирания рельефного изображения на термопластическом слое фототермопластический носитель способен регистрировать новые состояния объекта (или другие объекты), при этом изображение в ХСП сохраняется, и будет проявляться на термопластический слой при каждой фототермопластической записи.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования позволяют утверждать, что способ записи оптической информации в структуре металл – ХСП с использованием коронного разряда позволит улучшить параметры голографических оптических элементов на базе ХСП, используемых как самостоятельно, так и в различных оптоэлектронных и голографических измерительных системах, а также повысит качество и оперативность образования голографических изображений, особенно радужных. Способ записи голографических изображений в структуре металл – ХСП-термопластик позволяет исследовать различные состояния объекта методами голографического сравнения (корреляции и интерферометрии) с эталонным волновым фронтом, который хранится в ХСП слое, а следующие изображения регистрировать другим реверсивным термопластическим слоем. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Несеребряные фотографические процессы // под ред. А.Л. Картужанского. Л.: Химия, 1984, с.193-241.
2. Аникин В.И., Коршак О.Я., Панасюк Л.М., Ротарь В.К., Сухачев Ю.М. Двухэкспозиционная интерферометрия и спекл-фотография на фототермопластических регистрирующих средах. Сб. науч. тр. // Свойства светочувствительных материалов и их применение в голографии. Л.: Наука, 1987, с.100-105.
3. Настас А.М., Андриеш А.М., Бивол В.В., Присакарь А.М., Тридох Г.М. // Патент Республики Молдова «Способ регистрации оптической информации» 3330(13) В1 MD-ВОП1 5/2007.
4. Настас А.М., Андриеш В.В., Бивол А.М., Присакарь Г.М., Тридох Г.М. // ПЖТФ, 32(1), 2006, с.89-94.
5. Настас А.М., Андриеш А.М., Бивол В.В., Слепнев И.Н. // Патент Республики Молдова «Способ регистрации оптической информации» 3302(13) В1 MD-ВОП1 4/2007.



Формирование интерференционных картин поверхностных электромагнитных волн с изменяемым периодом с помощью дифракционных решёток

Е. А. Безус, Д. А. Быков, Л. Л. Досколович, И. И. Кадомин
Институт систем обработки изображений РАН, Самарский
государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева

Аннотация

Рассмотрено формирование интерференционных картин поверхностных электромагнитных волн с помощью диэлектрической дифракционной решётки с металлическим слоем. Моделирование в рамках электромагнитной теории показывает возможность получения контрастных интерференционных картин с периодом, в несколько раз меньшим периода решётки. При этом интенсивность поля в интерференционных максимумах в десятки раз превышает интенсивность падающей волны. Рассмотрены способы управления периодом интерференционной картины за счёт изменения длины волны и угла падения.

Введение

Одним из перспективных способов формирования микро- и наноструктур является фотолитография, основанная на формировании и регистрации интерференционных картин затухающих или поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) [1–6]. Использование затухающих волн и ПЭВ позволяет преодолеть дифракционный предел и формировать структуры с размерами деталей, в несколько раз меньшими, чем длина волны используемого света.

В работе [1] показана возможность получения интерференционной картины затухающих волн с помощью дифракционной решётки (ДР). Период интерференционной картины в [1] в два раза меньше периода используемой ДР и составляет половину длины волны. В [2, 3] рассмотрен аналогичный подход, основанный на использовании интерференции ПЭВ, возникающий на поверхности перфорированной металлической плёнки. В [4] предложен метод, основанный на интерференции затухающих волн, получаемых при полном внутреннем отражении. В [5, 6] для формирования интерференци-

онной картины ПЭВ используется ДР, расположенная над металлической плёнкой. В настоящей работе, как и в [6], для получения интерференционной картины ПЭВ используется диэлектрическая ДР с металлическим слоем в области подложки. В отличие от [5, 6], для возбуждения ПЭВ предлагается использовать высшие затухающие порядки дифракции. Приведённые расчёты показывают высокое качество формируемых интерференционных картин. Рассмотрены возможности изменения частоты интерференционной картины за счёт изменения длины волны и угла падения волны.

Формирование высокочастотной интерференционной картины ПЭВ

Исследуемая структура состоит из бинарной диэлектрической ДР и металлической плёнки, расположенной под решёткой (рис. 1). ДР предназначена для возбуждения на нижней границе металлической плёнки ПЭВ, которые формируют интерференционную картину. Рассмотрим случай нормального падения ТМ-поляризованной волны на структуру. При этом константы распространения прошедших дифракционных порядков имеют вид $k_{xi} = i\lambda_0/d$, $k_y = 0$, где λ_0 – длина волны. Условие возбуждения ПЭВ дифракционными порядками с номерами $\pm i$ на границе раздела металлический слой-подложка имеет вид

$$\sqrt{k_{xi}^2 + k_y^2} = \text{Re}(k_{spp}) = \text{Re}(k_0\alpha), \quad (1)$$

где $k_{spp} = k_0\alpha = k_0\sqrt{\varepsilon_m\varepsilon_{II}/(\varepsilon_m + \varepsilon_{II})}$ – константа распространения ПЭВ.

Из выражения (2) определяется период решётки:

$$d = i\lambda_0/\alpha \quad (3)$$

В этом случае период интерференционной картины ПЭВ

$$d_{\text{int}} = d/2i \quad (4)$$

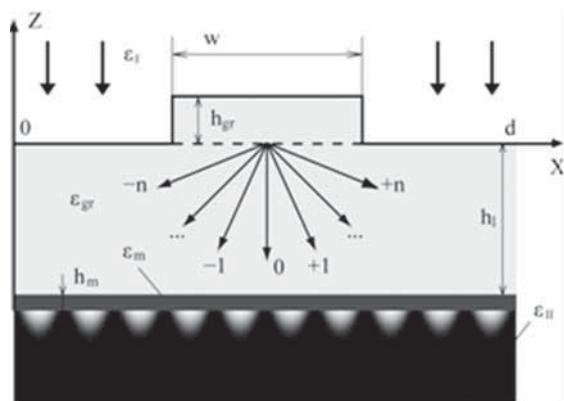


Рис. 1. Геометрия структуры (один период) и формируемая интерференционная картина

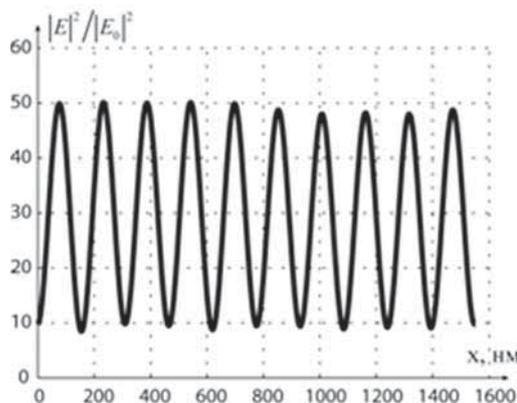


Рис. 2. Интерференционная картина

в $2i$ раз меньше периода ДР. В [5] ПЭВ возбуждались высшими незатухающими порядками, сформированными в области над металлической плёнкой. В этом случае диэлектрическая проницаемость материала решётки ϵ_{gr} должна быть существенно больше, чем диэлектрическая проницаемость материала ϵ_{II} под плёнкой. В данной работе рассматривается ситуация, когда порядки дифракции, используемые для возбуждения ПЭВ, являются затухающими. При этом ϵ_{gr} может быть даже меньше, чем ϵ_{II} .

Расчёт интерференционной картины ПЭВ проводился при следующих параметрах: длина волны $\lambda_0 = 550$ нм, $\epsilon_I = 1$ (воздух), $\epsilon_{II} = 2.56$, $\epsilon_m = -12.922 + 0.44727i$. Значение ϵ_{II} соответствует фоторезисту, а ϵ_m – диэлектрической проницаемости серебра для выбранной длины волны. Диэлектрическая проницаемость материала решётки ϵ_{gr} была также выбрана равной 2.56. Период решётки был рассчитан из выражения (3) при $i = 5$: $d = 1539.1$ нм. В этом случае период интерференционной картины $d_{int} = 154$ нм на порядок меньше периода ДР. Значения остальных геометрических параметров структуры $w = 0.5d$, $h_{gr} = 435.4$, $h_i = 0$, $h_m = 65$ нм были определены с помощью оптимизационной процедуры. Целевой функцией являлась мера близости расчётной интерференционной картины к «идеальной» интерференционной картине, формируемой при интерференции двух ПЭВ. Для расчёта интерференционной картины использовался модовый метод (RCWA – rigorous coupled wave analysis) в формулировке работ [7-9].

График нормированной интенсивности поля, формируемого непосредственно под металлическим слоем при указанных параметрах, представлен на рис. 2, который показывает формирование интерференционной картины с расчётным периодом $d_{int} = 154$ нм. Отметим, что период интерференционной картины не в только в 10 раз меньше периода ДР, но и в 3.57 раз меньше длины волны. Интенсивность поля в максимумах интерференционной картины превышает интенсивность падающей волны почти в 50 раз. Контраст полученной интерференцион-

ной картины равен 0.701. Таким образом, предложенная структура позволяет формировать интерференционную картину высокого качества.

Управление частотой интерференционной картины

Рассмотрим возможность управления частотой интерференционной картины за счёт изменения длины волны и угла падения падающей волны.

Рассмотрим сначала использование различных длин волн для формирования интерференционных картин различного периода. Пусть период d в (3) определён из условия возбуждения ПЭВ порядками с номерами $\pm i$ при длине волны λ_0 . При этом, длины волн, которые будут возбуждать ПЭВ порядками $\pm j$, могут быть найдены из уравнения

$$\lambda'_0 = d\alpha(\lambda'_0)/j \quad (5)$$

В частности, для рассмотренного случая $\lambda_0 = 550$ нм, $i = 5$, ПЭВ будут возбуждаться ± 4 порядками при длине волны 659 нм и порядками с номерами ± 3 при длине волны 852 нм. Соответствующие интерференционные картины будут иметь периоды 192 нм и 257 нм. Расчёт оптимальных геометрических параметров структуры, предназначенной для формирования трёх различных интерференционных картин при трёх указанных длинах волн, был проведён с использованием оптимизационной процедуры из условия максимального качества формируемых интерференционных картин. Были получены следующие параметры: $w = 0.37d$, $h_{gr} = 1000$, $h_i = 0$, $h_m = 69.8$ нм. Значения контраста и максимумов интенсивности составляют (0.71, 22.7), (0.78, 37), (0.87, 75.7) соответственно.

Второй способ управления частотой интерференционной картины состоит в изменении угла падения при фиксированной длине волны. Рассмотрим случай конической дифракции, геометрия которого представлена на рис. 3. В этом случае

$$k_{xi} = ik_0\lambda_0/d, k_y = k_0n_I \sin\theta, \quad (6)$$

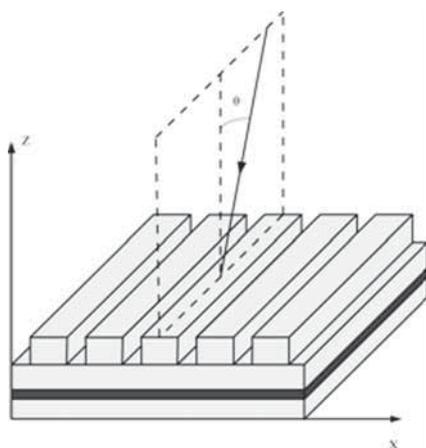


Рис. 3. Коническое падение

где $n_i = \sqrt{\epsilon_i}$, θ – угол падения. Согласно (6), условие возбуждения ПЭВ (2) может выполняться при различных сочетаниях угла падения и номера порядка дифракции i .

Рассмотрим пример. На рис. 4 приведены графики зависимости модуля проекции волнового вектора $\sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ от угла падения для $i=3$ (штрих-пунктирная линия), $i=4$ (точечная линия) и $i=5$ (пунктирная линия) при $n_i = 1.52$, $n_{gr} = \sqrt{\epsilon_{gr}} = 3$ (остальные параметры совпадают с предыдущими случаями). Указанные графики пересекает прямую $k_{spp} = \text{Re}\{k_0\alpha\}$ в точках 0° , 45° и 70.53° соответственно. Это означает, что при указанных углах ПЭВ будут возбуждаться соответствующими порядками дифракции. Геометрические параметры структуры $w = 0.534d$, $h_{gr} = 273$ нм, $h_i = 95.9$ нм, $h_m = 60$ нм были найдены в процессе оптимизации из условия максимизации качества формируемых интерференционных картин.

Значения периодов, контраста и максимумов интенсивности составляют $(154, 0.67, 23)$, $(192, 0.79, 34.7)$, $(257, 0.88, 40.4)$ соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blaikie R.J., McNab S.J. Evanescent interferometric lithography, Applied Optics. Vol.40. April 2001. No. 10, p. 1692–1698.
2. Luo X., Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique. Appl. Phys. Letters. Vol. 84, 2004. No. 23, P. 4780–4782.
3. Luo X., Ishihara T. Subwavelength photolithography based on surface-plasmon polariton resonance. Opt. Expr. Vol. 12. 2004. No. 14, P. 3055–3065.
4. Martinez-Anton J.C. Surface relief subwavelength gratings by means of total internal reflection evanescent wave interference lithography. J. Opt. A.: Pure Appl. Opt. 8 (2006), P. 213–218.
5. Jiao X., Wang P., Zhang D., Tang L., Xie J., Ming H. Numerical simulation of nanolithography with the subwavelength metallic grating waveguide structure. Optics Express. Vol. 14, 2006. No. 11, P. 4850–4860.
6. Doskolovich L.L., Kadamina E.A., Kadomina I.I. Nanoscale photolithography by means of surface plasmons interference, J. Opt. A.: Pure Appl. Opt. 9. 2007, P. 854–857.
7. Moharam M.G., Pommet D.A., Grann E.B., Gaylord T.K. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach. J. Opt. Soc. Am. A. Vol. 12, 1995. No.5, P. 1077–1086.
8. Moharam M.G., Grann E.B., Pommet D.A., Gaylord T.K. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings. J. Opt. Soc. Am. A. Vol. 12. 1995. No.5, P. 1068–1076.
9. Li. L. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures. J. Opt. Soc. Am. A. Vol. 13, 1996. No.9, P. 1870–1876.

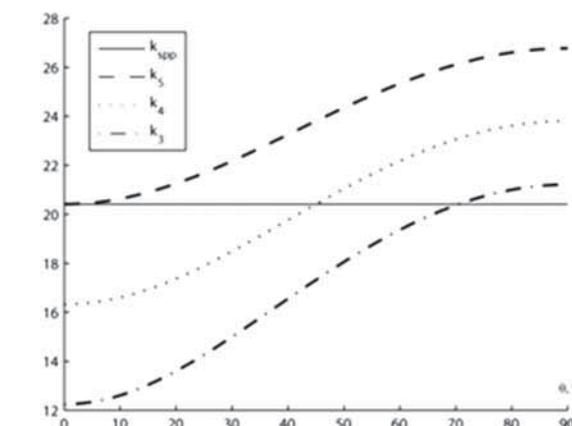


Рис. 4. Зависимость $\sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ от угла падения

Заключение

В работе предложен способ получения интерференционных картин поверхностных плазмонов с помощью многослойной структуры, содержащей диэлектрическую дифракционную решётку и металлический слой. Показано, что рассматриваемые структуры позволяют формировать интерференционные картины с высоким контрастом и высокой плотностью энергии в максимумах. Рассмотрены способы управления периодом интерференционной картины. Предложенные способы могут использоваться для целей контактной фотолитографии.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 07-07-97601-р_офи, 07-01-96602-р_поволжье_а, 07-07-91580-АСП_а, гранта Президента РФ № НШ-3086.2008.9, фонда «Фундаментальные исследования и высшее образование» (RUXO-014-SA-06) ■



ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ДЕМЕТАЛЛИЗАЦИЯ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

И. Й. Погань, А. А. Ивановский

■ Сегодня некоторые голографические технологии стали уже классическими. Они достаточно широко распространены и легкодоступны. Поэтому вопросу борьбы с подделками и имитациями голографических защитных элементов уделяется всё большее внимание. Донести всем потребителям нюансы защиты не представляется возможным, и производители пытаются не просто усложнить голограмму технически, а сделать её идентифицируемой уже на первом (визуальном) уровне контроля, чтобы исключить возможность даже имитации.

Замечательным шагом в этом направлении была разработка технологии деметаллизации – выборочного удаления слоя алюминия с голографической фольги. Деметаллизация принадлежит к защитным элементам первого уровня, то есть таким, которые должны быть распознаны невооружённым глазом. Появилась возмож-

ность придавать голограмме форму любой сложности, независимо от формы штампа, получать полупрозрачные голограммы, которые при нанесении на документ не закрывают собой полезную информацию. Оборудование, необходимое для технологии деметаллизации, достаточно дорогостоящее и доступно только крупным компаниям с высоким техническим уровнем специалистов.

Существует несколько основных типов деметаллизации: химическая и лазерная.

Химическая деметаллизация (рис. 1). Обратная сторона голографической плёнки выборочно защищается краской в тех местах, где слой алюминия должен остаться. Далее плёнка погружается в ванну со щелочным раствором для удаления металла с незащищённых участков. Технология отличается высокой производительностью. Однако точность совмещения с голографическим изображением (~1мм) и разрешение (300 dpi) небольшие.

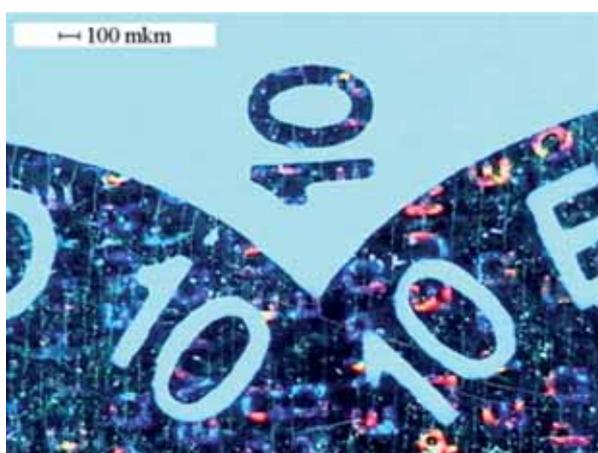


Рис. 1. Химическая деметаллизация.

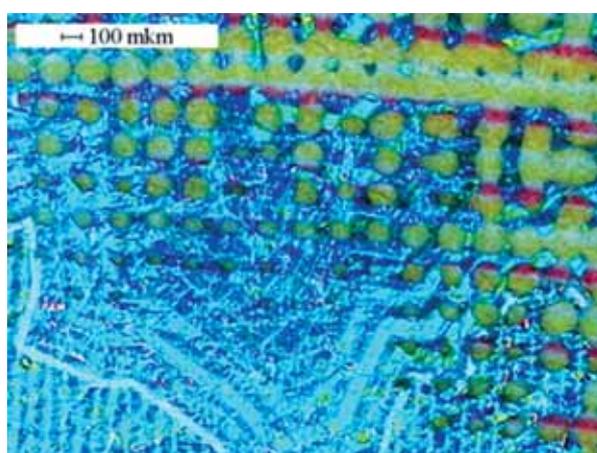


Рис. 2. Лазерная деметаллизация.

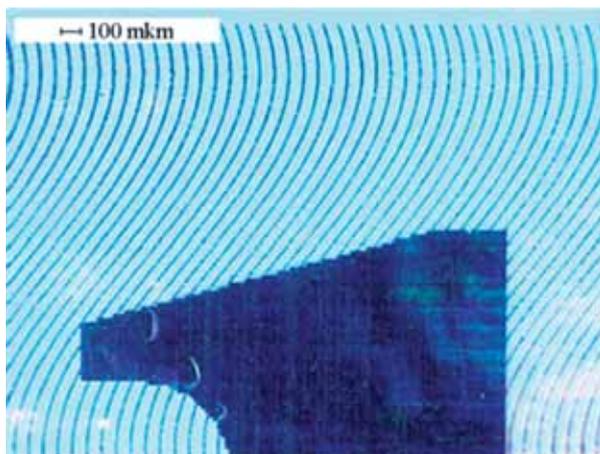


Рис. 3. Деметаллизация с высоким разрешением.

Выборочно удалять металл с поверхности плёнки можно также сфокусированным лазерным лучом (рис. 2). Поскольку дизайн деметаллизации можно менять для каждой голограммы, данная технология применяется, в основном, для нумерации. Недостатком является низкая скорость процесса, рваный деметаллизированный край, невысокие разрешающая способность и точность совмещения с голографическим изображением.

Специалисты ООО «Специализированное предприятие «Голография» разработали новую технологию голографической высокоразрешающей деметаллизации (рис. 3), обладающую рядом преимуществ. Голографическая деметаллизация – процесс, при котором форму и разрешение деметаллизации задаёт непосредственно голографическая структура. Таким образом, деметаллизация точно совпадает с голограммой. Принципиальной особенностью нашей технологии является возможность проведения деметаллизации в двух направлениях. Можно оставить металлизированным только голографическое изображение или, наоборот, удалить алюминий из участков с дифракционной структурой.

Радикальное увеличение разрешающей способности (до 5000 dpi) позволяет создавать защитные элементы, которые визуально существенно отличаются от обычных деметаллизированных голограмм. Так, например, полутонные деметаллизированные голографические элементы обладают всеми хорошо известными особенностями голограмм: радужной окраской, динамикой кинетических изображений, глубиной и, вместе с тем, даже при очень неудобном для голограмм рассеянном свете могут быть легко идентифицированы благодаря характерному деметаллизированному изображению.

Огромные возможности открываются для комбинирования голографических и полиграфических изображений. На рис. 4 показан пример совмещения полутонной деметаллизированной голограммы с полиграфическим изображением. Подделка или имитация такого защитного элемента невозможна.



полиграфическое изображение



голографическое изображение



комбинированное изображение

Рис. 4. Полутонная голографическая деметаллизация.

Мы видим применение технологии голографической деметаллизации в задачах защиты документов и товаров от подделок, где выдвигаются самые высокие требования: паспорта, банкноты, визы, удостоверения личности и т. п. ■



Терминологический словарь по прикладной голографии

О. В. Андреева, к.т.н., СПб ГОИ

Предисловие

Голография, как научное направление и область научно-технической деятельности, насчитывает уже 60 лет своего существования.

В настоящее время голографический метод занял своё место во многих областях науки и техники: защитная голография стала неотъемлемой частью жизни современного общества; перспективы развития информационных технологий нельзя рассматривать без включения и использования голографии; синтез цифровых и оптических технологий в голографии демонстрирует огромные перспективы этого направления. Образовательный компонент представляет собой важную часть процесса развития голографии. Голографический метод используют специалисты разных направлений, число которых неуклонно пополняется, а доступной литературы по голографии в России практически не существует. Поэтому важной задачей является выработка и создание современной русскоязычной терминологии голографии, которая невозможна без подготовки доступного терминологического словаря, отражающего основные понятия на современном уровне представлений этой области деятельности. Такой словарь, в первую очередь, должен восполнить существующий на сегодняшний день пробел — отсутствие доступной литературы по голографии, что, безусловно, будет способствовать повышению интереса к этой научно-технической области, в особенности среди молодёжи. При подготовке словаря использована терминология, принятая в рамках голографической научной школы Ю.Н.Денисюка и поддерживаемая его учениками и последователями, а также термины, понятия и определения, используемые в общем курсе физики для технических вузов.

Бентона голограмма (голограмма радужная) — голограмма сфокусированного изображения, допускающая восстановление объектной волны источником излучения со сплошным спектром (лампа накаливания, Солнце) за счет ограничения пространственного спектра объекта в одном (как правило, вертикальном) направлении. Снижение параллакса в вертикальном направлении практически незаметно для наблюдателя, который за счет зрения двумя глазами ощущает параллакс в горизонтальном направлении. Радужная голограмма позволяет наблюдать четкое цветное изображение объекта (в отличие от размытого изображения объекта при использовании голо-

граммы, полученной без ограничения пространственного спектра объектной волны). При этом цвет изображения зависит от положения глаз наблюдателя и не связан с цветом объекта. Радужные голограммы получили широкое распространение в качестве изобразительных голограмм, различных элементов кодирования, маркировки, украшения полиграфической продукции и для повышения защищенности от подделок документов, ценных бумаг и товарных знаков. Широкое применение радужных голограмм связано с возможностью использования для их регистрации светочувствительных материалов, образующих поверхностный рельеф (рельефографические материалы), что позволяет производить массовое копирование таких голограмм контактным способом. Метод получения радужных голограмм был предложен С. А. Бентоном (Stephen A. Benton) в 1976 г.

Волна объектная (предметная) — одна из волн, образующих интерференционную картину при регистрации голограммы, в которой содержится информация, предназначенная для воспроизведения или преобразования. Восстановленная (дифрагированная) волна, как правило, воспроизводит именно объектную волну. Обычно объектная волна формируется излучением, прошедшим через объект, либо отражённым от него. В ряде случаев объектной называют ту волну, которая имеет более сложную форму. Иногда деление волн на объектную и опорную является достаточно условным и может быть вообще лишено смысла, например, при получении голографических дифракционных решёток, когда используют волны одинаковой формы.

Волна опорная (референтная) — одна из волн, образующих интерференционную картину при регистрации голограммы, которая обычно используется для восстановления объектной волны. Как правило, опорная волна имеет простую и легко воспроизводимую форму, например, плоскую или сферическую. В ряде случаев в качестве опорной волны используют кодированные волны, а также компоненты объектных волн.

Волновое число — модуль волнового вектора, который в изотропной среде совпадает по направлению с направлением нормали к волновому фронту. Волновое число k связано с круговой частотой ω , фазовой скоростью U_ϕ и пространственным периодом (длиной волны) λ

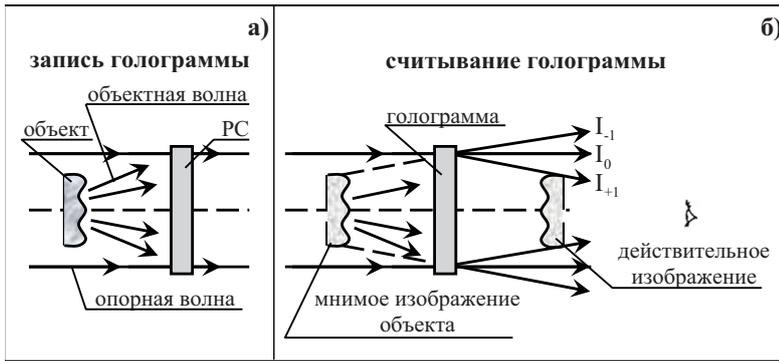


Рис. 1. Схема записи (а) и считывания (б) голограммы Габора

соотношением $k = 2\pi/\lambda = \omega/U_{\phi}$. При анализе периодических процессов, развивающихся в пространстве, используют понятие пространственной частоты (λ^{-1}) или круговой пространственной частоты ($2\pi/\lambda$). Единица измерения волнового числа и пространственной частоты в системе СИ – m^{-1} ; в спектроскопии часто используется cm^{-1} .

Волновой вектор – вектор k , определяющий направление распространения плоской монохроматической волны в изотропной среде. Модуль волнового вектора называется волновым числом $k = 2\pi/\lambda$, где λ – пространственный период или длина волны излучения.

Волновой фронт (волновая поверхность) – поверхность, во всех точках которой волна имеет в данный момент времени одинаковую фазу. Распространение волны происходит в направлении нормали к волновому фронту и может рассматриваться как движение волнового фронта через среду. В простейшем случае волновой фронт представляет плоскую поверхность, а соответствующая ему волна называется плоской. Существуют также сферические, цилиндрические и другие волновые фронты. Излучение точечного источника в изотропной среде имеет волновой фронт сферической формы.

Габора голограмма – осевая пропускающая двумерная голограмма, при регистрации которой источник света, прозрачный объект (О) и регистрирующая среда (РС) расположены на общей прямой (рис.1а). Излучение, рассеянное объектом, создаёт объектную волну, а опорная волна представляет собой часть излучения, прошедшую через объект без изменения направления. При освещении голограммы Габора (рис.1б) волны $+1(l_{+1})$ и $-1(l_{-1})$ порядков дифракции образуют действительное и мнимое изображения объекта, которые находятся на одной оси. При наблюдении изображений, формируемых голограммой Габора, дифрагированные волны и волна, прошедшая голограмму без дифракции (l_0), накладываются друг на друга и создают взаимные помехи, из-за которых голограмма Габора не

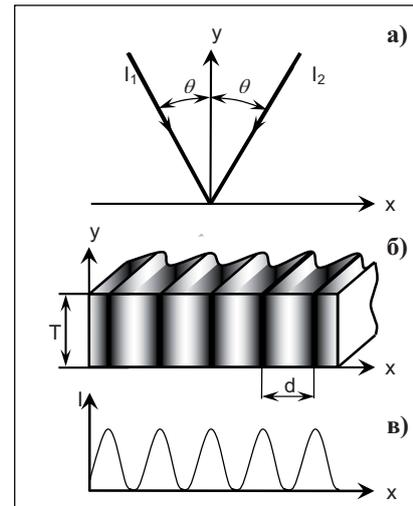


Рис. 2. Элементарная голограмма: а) направление распространения интерферирующих пучков; б) одномерная решётка с периодом d , полученная в регистрирующей среде с толщиной T ; в) распределение интенсивности излучения в интерференционной картине по оси «x» (в направлении вектора решётки).

получила широкого распространения. В настоящее время голограммы Габора применяются для регистрации пространственных ансамблей частиц малых размеров при изготовлении осевых голограммных элементов. На примере получения такой голограммы Д. Габор в 1947 г. доказал возможность записи и восстановления амплитуды и фазы волны, распространяющейся от объекта. Д. Габор (Dennis Gabor) – основатель голографии, лауреат Нобелевской премии (1972 г.).

Голограмма – зарегистрированный результат взаимодействия (интерференции) двух или более когерентных волн. Голограмма может быть получена физическими методами в результате взаимодействия излучения с приёмником (регистрирующей средой) или синтезирована с использованием иных методов (например, методов вычислительной техники). Падающее на голограмму излучение в результате дифракции на её структуре преобразуется в восстановленную (дифрагированную) волну, параметры которой могут совпадать с одной из использованных для получения голограммы волн, а также находиться с ними в определённых соотношениях (например, сопряжённые волны).

В простейшем случае взаимодействия двух когерентных плоских волн I_1 и I_2 (рис. 2) голограмма называется элементарной и представляет собой одномерную решётку толщины T , в которой изменение параметров среды происходит по координате x (рис. 2б). При этом расстояние между соседними максимумами интенсивности в регистрируемой интерференционной картине (рис. 2в) $d = \lambda/(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)$, где λ – длина волны регистрируе-

Таблица.

Тип решётки	Двумерная амплитудная голограмма	Трёхмерная амплитудная голограмма	
	Пропускающая	Пропускающая	Отражательная
Синусоидальная	6,25%	3,7%	7,2%
Прямоугольная	10%	25%	60%

мого излучения, θ_1 и θ_2 – углы падения интерферирующих волн I_1 и I_2 на регистрирующую среду (на рисунке приведена симметричная схема записи голограммы, где $\theta_1 = \theta_2 = \theta$). Элементарная голограмма, полученная в линейной регистрирующей среде, является синусоидальной решёткой, а параметр d в этом случае определяет период изменения оптических постоянных в голограмме, то есть её пространственную частоту. Элементарные голограммы являются хорошо изученной и удобной моделью для количественных оценок и аналитического описания процессов получения и считывания голограмм. Произвольную голограмму в ряде случаев можно представить в виде суперпозиции элементарных голограмм с различными параметрами. Важнейшими характеристиками, определяющими свойства полученных голограмм, являются: пространственная частота голограммы ν , толщина голограммы T , характер отклика регистрирующей среды на воздействие излучения, ориентация изофазных поверхностей интерференционной картины относительно границ голограммы.

Голограмма амплитудная – голограмма, дифракция излучения на которой обусловлена изменением коэффициента поглощения среды. Амплитудные голограммы получают на галогенидосеребряных фотографических материалах, на фотохромных средах, термопластических материалах и т. д. Эффективность амплитудных голограмм, как правило, невысока и зависит от типа голограммы и характера фотоотклика среды. В таблице приведены максимально достижимые значения дифракционной эффективности, вычисленные для элементарных амплитудных голограмм.

Уникальной особенностью является эффект просветления трёхмерных амплитудных голограмм (эффект Бормана), заключающийся в том, что суммарная интенсивность волн, прошедших голограмму при её освещении в условиях Брэгга, может существенно превышать интенсивность прошедшей через голограмму волны при её освещении вне условий Брэгга, когда интенсивность дифрагированной волны можно считать равной нулю. Эффект возникает за счёт того, что существующие одновременно восстанавливающая и дифрагированная волны формируют стоячую волну, максимумы которой совпадают с минимумами амплитудной голограммы, что

приводит к уменьшению результирующего поглощения голограммы. Амплитудные голограммы обычно используют при необходимости воспроизведения объектной волны с минимальными искажениями.

Голограмма безопорная – голограмма, полученная без использования опорного (референтного) пучка. Запись безопорной голограммы осуществляется в объёмной регистрирующей среде с использованием

только объектной волны; интерференционная структура голограммы обусловлена когерентным взаимодействием излучения различных частей объекта; восстановление объектной волны может быть осуществлено при освещении голограммы излучением, сформированным только отдельным участком объекта. Безопорные голограммы используются при создании диффузоров, в схемах с обращением волнового фронта («бриллиантовое зеркало») и других технических приложениях.

Голограмма внеосевая – пропускающая голограмма, при регистрации которой используется угол между объектной и опорной волнами, позволяющий пространственно разделить волны нулевого, +1 и -1 порядков дифракции. Большинство существующих голографических схем служит для получения внеосевых голограмм.

Голограмма двумерная (плоская) – голограмма, при рассмотрении которой можно пренебречь эффектами, связанными с её конечной толщиной. При освещении двумерной голограммы образуются, по крайней мере, две дифрагированные волны (+1 и -1 порядков дифракции), которые формируют действительное изображение объекта ($k = +1$), и мнимое изображение ($k = -1$), а также присутствует волна нулевого порядка дифракции ($k = 0$). В большинстве практических случаев происходит образование большего количества порядков дифракции. Математический аппарат, разработанный для традиционных (плоских) дифракционных решёток (полученных, например, методом нанесения штрихов на гладкую поверхность) применим и для теоретического анализа двумерной голограммы. При восстановлении объектной волны для двумерной голограммы существует принципиальная возможность изменения масштаба изображения объекта путём соответствующего выбора параметров схемы и длины волны излучения при регистрации голограммы и её считывании. Использование излучения различного спектрального состава при записи и восстановлении объектной волны даёт возможность неструктивного считывания двумерных голограмм и обеспечивает их широкое применение в качестве управляемых транспарантов в системах обработки информации. ■

Продолжение следует.



ОБРАБОТКА ЦВЕТА ДЛЯ ЦИФРОВОГО КИНЕМАТОГРАФА 3:

Минимальная глубина линейного квантования, кодирование глубоких теней, согласование цветовой гаммы и колориметрия для допусков в стандартах



Thomas O. Maier

COLOR PROCESSING FOR DIGITAL CINEMA 3: Minimum Linear Bit Depth, encoding of Near Blacks, Gamut Mapping, and Colorimetry for the Tolerances in the Standards

|| Перевод В. Сычёва, к.т.н., ОАО «НИКФИ» ||

Эта серия статей по цветовой обработке для цифрового кинематографа основана на Руководстве для инженеров SMPTE 432-1. Комитет DC28 надеется, что информация этого руководства будет более доступна, если опубликовать её в виде серии журнальных статей. В данной, третьей в серии, статье обсуждается комплекс тем, важных для проектирования и понимания кодированных изображений в системах цифрового кинематографа. В частности, в статье обсуждаются минимальная глубина линейного квантования, необходимая в проекторе, кодирование очень тёмных цветов, согласование цветовой гаммы и основные колориметрические равенства, необходимые для понимания спецификации допусков в стандартах.

Предисловие переводчика

Предлагаемый Вашему вниманию перевод открывает серию статей по цветовому кодированию в цифровом кинематографе, печатаемых в журнале SMPTE. В тексте встречаются термины, не имеющие устоявшихся аналогов в русском языке. Предлагаемый перевод таких терминов приведён в конце статьи.

К сожалению, разработчики стандартов продолжили практику сжатия информации, принятую в телевидении. Алгоритм сжатия основан на степенной функции, а не на логарифмической, как принято в кинематографе. Логарифмическое сжатие, во-первых, соответствует визуальному восприятию (человеческий глаз регистрирует относительное приращение яркости), во-вторых, обеспечивает более эффективное сжатие в области больших яркостей и, в-третьих, исключило бы проблемы с декодированием глубоких теней, описанные в данной статье. Тем не менее, de facto, приняты эти стандарты кодирования, и редакция считает публикацию этих материалов интересной для специалистов.

■ Все стандарты, которые будут необходимы для кодирования и декодирования цветовой информации для цифрового кинематографа, опубликованы или будут опубликованы в самом ближайшем будущем. Стандарт описывает только результат окончательного консенсуса людей, вовлечённых в написание этого стандарта, и не включает причины выбора того, что в него входит. Кроме того, поскольку каждый стандарт самодостаточен, не всегда ясно, как все стандарты, имеющие отношение к какому-либо вопросу, работают вместе. Поэтому было написано Руководство для инженеров [1]. Эта серия статей написана для того, чтобы сделать информацию в этом Руководстве более доступной.

Были адаптированы или находятся в процессе адаптации многие стандарты, связанные с демонстрацией в кинотеатрах изображений при помощи цифровых проекторов. Однако только пять стандартов [1-5] относятся к цветовому кодированию или цветовому воспроизведению в кинотеатре. В настоящей серии статей обсуждаются эти пять связанных с цветом стандартов. Настоящая, третья в серии статья описывает минимальную глубину линейного квантования, необходимую в проекторе, кодирование очень тёмных цветов, согласование цветовой гаммы и основные колориметрические равенства, необходимые для понимания спецификации допусков в стандартах.

Эта серия статей фокусируется на цветовом кодировании и декодировании изображений для цифрового кино в соответствии со стандартами SMPTE, практическими рекомендациями и инженерными руководствами. Статья Сильвы [6] и книга Кеннела [7] дают существенно больше информации по полной технологии цифрового кинематографа.

Следующие равенства определяют функцию кодирующего преобразования для DCDM (прокатная цифровая копия), где X, Y, Z – координаты цвета над уровнем чёрного в кинотеатре:

$$CV_{X'} = INT \left[4095 * \left(\frac{L * X}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right] \quad 1)$$

$$CV_{Y'} = INT \left[4095 * \left(\frac{L * Y}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right] \quad 2)$$

$$CV_{Z'} = INT \left[4095 * \left(\frac{L * Z}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right] \quad 3)$$

Для простоты записи закодированных значений принято использовать X' для CV_{X'}, Y' для CV_{Y'}, Z' для CV_{Z'}. Важно помнить, что эти закодированные XYZ координаты измерены с экрана над уровнем чёрного в кинотеатре.

Равенства для декодирования закодированной цветовой информации получают обратным преобразованием кодирующих равенств:

$$X = \left(\frac{52,37}{L} \right) * \left(\frac{X'}{4095} \right)^{2.6} \quad 4)$$

$$Y = \left(\frac{52,37}{L} \right) * \left(\frac{Y'}{4095} \right)^{2.6} \quad 5)$$

$$Z = \left(\frac{52,37}{L} \right) * \left(\frac{Z'}{4095} \right)^{2.6} \quad 6)$$

Минимальная глубина квантования линейных RGB сигналов, необходимая в эталонном проекторе

В первых двух статьях серии [8,9] было показано, что кодирующие равенства DCDM основаны на минимальной модуляции, видимой наблюдателем на изображении в кинозале. Кодирующая гамма (1/2.6) выбрана для минимизации количества бит, необходимых для кодирования DCDM изображений, и для минимизации артефактов оконтуривания. Однако внутри проектора обычно должна быть точка, в которой DCDM кодирование преобразуется в линейное кодирование. Хотя это не входит в какие-либо стандарты или рекомендованные практики, резонно спросить, сколько бит необходимо для кодирования линейных RGB значений в эталонном проекторе, чтобы также донести до зрителя всю информацию и избежать вероятности появления артефактов оконтуривания. Равенство для модуляции (m) может быть преобразовано к порогу видимости ($\Delta L_{\text{threshold}}$) как функции средней яркости изображения (L_{average}):

$$\Delta L_{\text{threshold}} = 2 * m * L_{\text{average}} \quad 7)$$

Используя равенства из книги Бартена [10] и равенство 7, была рассчитана функция яркостной пороговой чувствительности человеческого зрения (Human Vision Delta Luminance Threshold – HVDLT) – рис. 1. При кодировании с гаммой (1/2.6) закодированное изменение яркости для каждого изменения значения кода различно и возрастает с ростом значения кода. Однако при линейном кодировании изменение яркости для каждого изменения значения кода одинаково независимо от значения кода. Следовательно, изменение яркости при линейном кодировании зависит от количества значений кода при кодировании:

$$\Delta L_{\text{Linear}} = 48 / (2^n - 1) \quad 8)$$

где ΔL_{Linear} – приращение яркости при увеличении значения линейного кода на 1;

n – глубина квантования для линейного кодирования;

48 – максимальная яркость белого 48 кд/м².

ΔL_{Linear} показано на рис. 1 для глубины модуляции 14, 15, 16 и 17 бит. На рис.1 показаны также минимальные яркости, определяющие контраст 2000:1 (отношение для эталонного проектора) и 4000:1 (отношение, недостижимое для реального устройства отображения). Из рисунка 1

Таблица 1. Результаты расчёта max контраста при линейном кодировании с глубиной 14, 15, 16 и 17 бит.

Глубина квантования	ΔL_{Linear} , кд/м ²	Яркость HVDLT, соответствующая ΔL_{Linear}	Контраст, рассчитанный на основе HVDLT	Контраст, рассчитанный на основе 10xHVDLT
14	0,00293	0,403	119:1	4350:1
15	0,00146	0.144	333:1	14250:1
16	0,00073	0.049	977:1	48920:1
17	0,00037	0.016	3003:1	176000:1

видно, что для линейного кодирования с контрастом 4000:1 необходимо более 17 бит, и более 16 бит необходимо для контраста 2000:1.

В таблице 1 приведены результаты расчёта максимального контраста, которые могут быть закодированы при линейном кодировании с глубиной 14, 15, 16 и 17 бит. Кривая HVDLT определяет минимальное изменение яркости, которое можно увидеть на образце, к которому зрительная система человека наиболее чувствительна. Образец содержит не менее 15 синусоидальных или квадратных волн. Артефакт оконтуривания составляет только половину квадратной волны, а пороговое изменение яркости для половины квадратной волны примерно в 10 раз выше HVDLT. Эта 10*HVDLT кривая более практична при разработке проектора. Она также приведена на рис. 1. Из этого анализа видно, что 14 бит и, возможно, 13 бит не приведут к появлению артефактов оконтуривания. Любой шум или гранулярность проецируемого изображения уменьшают необходимую глубину резкости. Автор наблюдал существенные контуры на клине, когда для кодирования линейных данных использовалось только 12 бит.

Объяснение Приложения В к SMPTE 428-1

При разработке кодирующих равенств DCDM, поскольку ранее уже согласовано 12-битное кодирование, важно было позаботиться об использовании кода вблизи значений 0 и 4095. Как объяснено во второй статье данной серии, постоянная 52.37 была выбрана таким образом, чтобы позволить кодирование D65 при максимальной яркости; однако эта константа определяет также закодированное значение яркости белого, 48 кд/м², равное 3960, как следует из равенства 2. Это снимает вопросы кодирования высоких значений, но не вблизи 0. Приложение В к SMPTE 428-1 объясняет, почему не возникает проблем при кодировании теней. Данный раздел более детально объясняет причины выбора параметров в Приложении В.

Нет ограничений на использование кодовых значений 0, 1, 2 и т. д. Следовательно, технически зазора снизу нет, однако практически он существует. Из рис.1 видно, что для проектора с контрастом 2000:1 при минимальных яркостях пороговое приращение яркости составляет 0.00048 кд/м². Кодирующие равенства DCDM основаны на относительных значениях XYZ над уровнем чёрного кинозала. Используя равенство 2, получаем, что значение кода DCDM для яркости 0.00048 кд/м² над уровнем чёрного составляет 45. Это означает, что на чёрном поле с яркостью 0.024 кд/м² большинство наблюдателей не увидят синусоидальной волны, определяемой минимальным и максимальным значениями Y' кода 0 и 45. Аналогичные расчёты для контраста 4000:1 дают максимальное значение кода 35. Расчёт этих значений предполагает наблюдение синусоидальной волны при идеальных условиях. При любых других условиях порог модуляции будет больше и значение кода выше. В частности, наличие в изображении более светлых эле-

Таблица 2. Преобразование XYZ голубого цвета в X'Y'Z' и нормированные значения RGB проектора

Наименование	Значение 1	Значение 2	Значение 3
Плѐнка XYZ	2.799	3.822	12.303
Плѐнка xyz	0.1479	0.2020	0.6501
DCDM X'Y'Z'	1327	1496	2346
Абсолютные XYZ эталонного проектора	2.797	3.820	12.305
Нормированные RGB эталонного проектора, RRP'GRP'BRP	-0.035	0.094	0.278

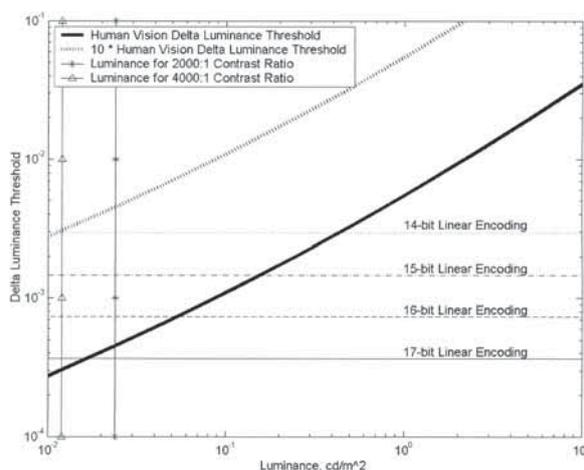


Рис. 1. Функция max и min яркости пороговой чувствительности человеческого зрения (HVDLT)

ментов сделает синусоидальную волну менее видимой. Следовательно, в нижней части шкалы кодирования есть зазор, по крайней мере, в 45 единиц для проекторов с контрастом 2000:1.

Согласование цветовой гаммы

Есть ряд причин, по которым закодированный цвет может оказаться вне границ воспроизведения цветовой гаммы эталонного проектора (Reference Projector Gamut Boundary – RPGB). На рис. 2 в координатном пространстве цветности приведены максимальные гаммы эталонного проектора, киноплѐнки, спектрального локуса и пространства XYZ. Очевидно, некоторые плѐночные цвета лежат вне RPGB. Другой пример: если при производстве контента используется мастеринг-проектор с цветовым базисом, не совпадающим с RPGB, возможно появление закодированных цветов изображения, лежащих вне RPGB. Если это случилось, и изображение демонстрируется на эталонном проекторе, должна быть стратегия замены цветов, которые проектор не может воспроизвести, цветами, которые он воспроизвести может.

Таблица 3. Результирующие значения XYZ и xuz для голубого цвета

Наименование	Значение 1	Значение 2	Значение 3
Нормированные RGB эталонного проектора, RRP'GRP'BRP	-0.035	0.094	0.278
Согласование гаммы обрезанием, значения RGB, RRP'GRP'BRP	0.000	0.094	0.278
Согласование гаммы обрезанием, значения XYZ	3.546	4.172	12.305
Согласование гаммы обрезанием, значения xuz	0.1770	0.2084	0.6145

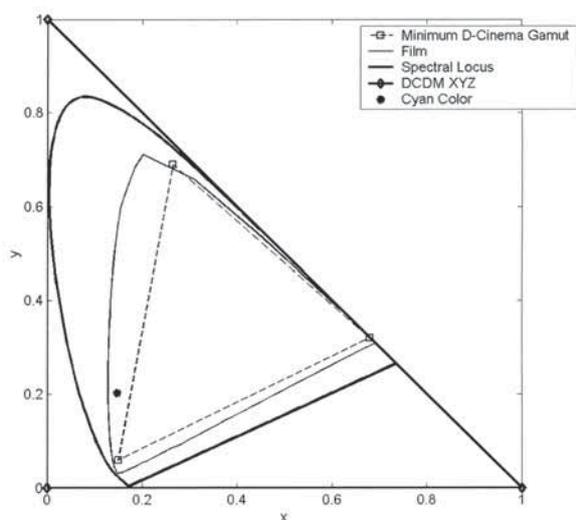


Рис. 2. Мах гаммы эталонного проектора, киноплёнки, спектрального локуса и пространства XYZ

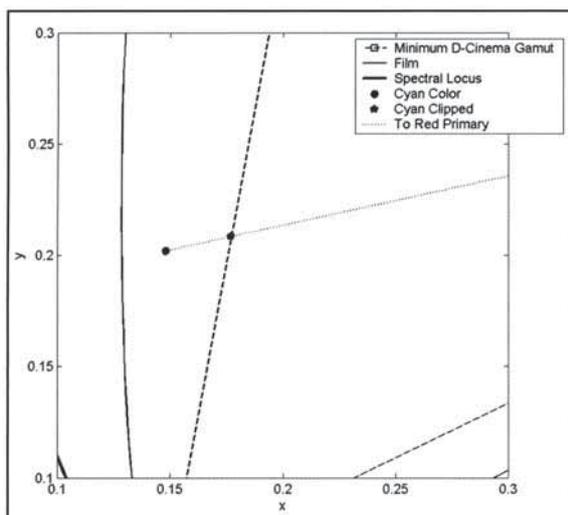


Рис. 3. Кодированный голубой цвет

Этот процесс называется согласованием цветовой гаммы (gamut mapping).

Рассмотрим голубой цвет, показанный на рис. 2, в качестве примера того, что можно сделать с цветами, выходящими за воспроизводимую гамму. В таблицах 2 и 3 приведены результаты расчётов для этого цвета. Таблица 2 показывает преобразование значений XYZ голубого цвета в X'Y'Z' и нормированные значения RGB проектора. В таблице 3 показано, как обрезаются нормированные значения RGB и получаются результирующие значения XYZ и xuz. Нормированные значения RGB – это линейные количества базисных составляющих RGB проектора, необходимые для формирования

данного цвета. Ноль означает, что эта составляющая не используется; единица означает, что для создания цвета используется максимальное количество базисной составляющей. Нормированные значения RGB не могут быть меньше 0 и больше 1.

Таблица 2 показывает, что голубой цвет может быть кодирован стандартной DCDM процедурой, но нормированное значение R эталонного проектора окажется отрицательным, равным -0.035 . Следовательно, эталонный проектор не сможет воспроизвести данный голубой цвет, поскольку нормированное значение R меньше 0.

Если эталонный проектор не может воспроизвести данный кодированный голубой цвет, он должен воспроизвести другой цвет. Все системы отображения, включая плёночную, должны иметь стратегию согласования цветовой гаммы. В плёнке это делается химически и не является столь же очевидным, как согласование гаммы в цифровых системах. Здесь не будет дано никаких рекомендаций по стратегии согласования гаммы. Это реализационное решение, которое не является частью какого-либо D-Cinema стандарта. Кроме того, существует множество стратегий согласования цветовой гаммы и никакого консенсуса, какая из стратегий лучше. Однако, описав пару простых стратегий, можно продемонстрировать основные принципы согласования.

Простейшей стратегией согласования цветовой гаммы является обрезание всех нормированных RGB эталонного проектора, меньших 0 до 0 и больших 1 до 1. Проблема этой простой стратегии состоит в том, что обычно она приводит к сдвигу цветового тона воспроизводимого на экране цвета, а люди довольно чувствительны к подобным сдвигам. Если цвет немного темнее или светлее, или менее насыщен (согласование гаммы обычно не увеличивает насыщенности цвета), цветовое изменение менее заметно, чем когда цвет меняет тон. Конечно, есть допустимые сдвиги цветности; однако в общем случае люди стараются избегать более чем минимальных отклонений цветового тона. Поэтому простое обрезание не является предпочтительной стратегией согласования гаммы.

Таблица 3 и рис. 3 показывают результат обрезания для голубого цвета. Масштаб рисунка 3 существенно увеличен в районе голубого цвета так, чтобы выделить

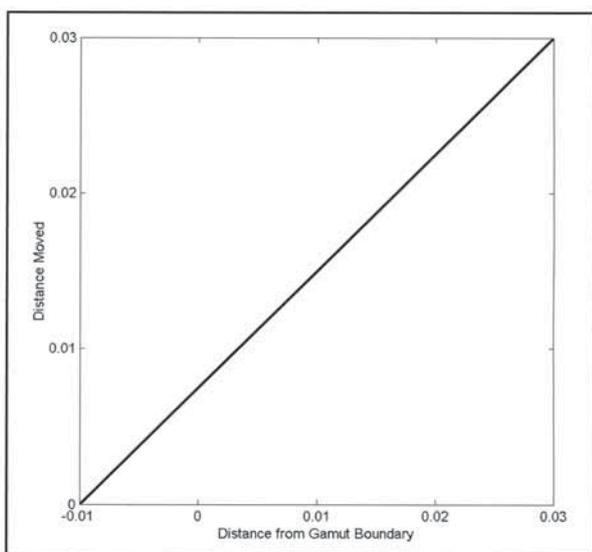


Рис. 4. Стратегия согласования цвета CRPGB

сдвиг цветности вследствие обрезания. Обрезанный голубой цвет лежит на линии, соединяющей координаты цветности исходного голубого цвета и базисного красного цвета эталонного проектора. Эта линия показана пунктиром на рис. 3.

Другая проблема со стратегией простого обрезания для согласования гаммы видна на рис. 3. На линии, соединяющей исходный голубой цвет с соответствующим голубым в пределах воспроизводимой гаммы, лежит целый ряд возможных цветов, которые будут отображены одним и тем же голубым цветом. В результате на изображении, содержащем серию слабо изменяющихся цветов, как, например, ряд переменной насыщенности, получится один и тот же цвет. На изображении это будет выглядеть как однородное неприятное цветовое пятно.

Из вышеприведённого обсуждения видно, что обрезание – крайне скверная стратегия согласования гаммы, которая никогда не должна использоваться. Однако автор обнаружил, что в системах цифрового кинематографа обрезание не считается столь неприемлемым, как многие «хорошие» стратегии согласования. Причина в том, что в киноизображении мало цветов, выходящих за RPGB. Следовательно, стратегия согласования, сдвигающая многие цвета, лежащие внутри гаммы, ради того, чтобы спасти от обрезания немногие, может на практике приводить к снижению качества. В конце концов, лучшей стратегией оказывается комбинация персональных предпочтений по замене одного цвета на другой и имеющегося оборудования для реализации выбранной стратегии.

Другая простая стратегия согласования состоит в том, чтобы сместить самый далекий от RPGB цвет к RPGB, а все цвета, лежащие между самым дальним цветом и RPGB, – немного вглубь RPGB. Это определяет шкалу сжатия насыщенности для перемещаемых цветов с некоторой дифференциацией среди них, что, в целом, даёт более приятный результат. Рис. 4 показывает возмож-

ную стратегию согласования гаммы, реализующую эти идеи. На рис. 3 кодированный голубой цвет находится на расстоянии 0.030 единиц пространства цветности от RPGB. Пусть этот голубой – самый дальний от RPGB. Тогда, согласно рис. 4, его необходимо передвинуть на 0.030 ху единицы, чтобы попасть точно на RPGB. Соответственно, цвет, лежащий на 0.020 ху единиц вне RPGB, сдвинется на 0.0225 ху единиц и окажется на 0.0025 ху единиц внутри RPGB. Цвет, находящийся исходно точно на RPGB, передвинется на 0.0075 ху единиц. Во всех этих примерах движение осуществляется в сторону базисного красного. И, наконец, любой цвет, находящийся внутри RPGB более чем на 0.010 ху единиц, смещаться не будет.

Эта стратегия смещения цветов, частично даже находящихся внутри границ цветовой гаммы, таким образом, что никакие цвета не попадают в одну точку, может быть применена для всех возможных углов цветового тона. Более распространено перемещение цветов в сторону нейтральной оси (белой точки в координатах цветности), чем в направлении координат цветности базиса, но принцип остаётся тем же самым. При определении данной стратегии полезно знать, насколько далеко от гаммы могут лежать цвета. В частности, важнее всего цвет, находящийся на максимальном расстоянии от границ гаммы. К примеру, если бы максимальное расстояние кодированного голубого от границы гаммы составляло 0.060 ху единиц вместо 0.030, рис. 4 должен был бы выглядеть несколько иначе. В этом случае, возможно, придётся сдвигать даже цвета, находящиеся на 0.020 единиц внутри границ гаммы.

Проблема в том, что чем дальше от границ гаммы лежат исходные цвета, тем больше цветов внутри гаммы будет сдвинуто. Если никакие цвета не выходят за границы гаммы, нет необходимости что-либо двигать. Поэтому полезно знать пределы цветов, которые могут попасть вне гаммы проектора. Кодированный цвет – это желаемый цвет и цвет, который может воспроизвести цифровой проектор. Однако в случаях, когда кодированные цвета выпадают из гаммы цифрового проектора в кинотеатре, в проекторе должно производиться согласование цветовой гаммы, чтобы воспроизводить эти цвета.

Этот простой пример демонстрирует принцип большинства стратегий согласования гаммы: чтобы сохранить разделение цветов, некоторые цвета внутри RPGB должны быть сдвинуты дальше вглубь RPGB. В общем, расстояние, на которое сдвигаются цвета внутри RPGB, пропорционально максимальному расстоянию, на которое нужно сдвинуть самый дальний от RPGB цвет к его границе. Разумная оценка гаммы кодированных цветов полезна при разработке стратегии согласования гамм, поскольку она минимизирует цветовой сдвиг, необходимый для приведения кодированных цветов к воспроизводимой гамме. Большинство стратегий согласования гамм сдвигают входящие в RPGB цвета к нейтральной оси. Чересчур большие сдвиги снижают насыщенность цветов и приводят к малоцветным изображениям.

Пространство XYZ включает все возможные кодированные цвета, т.е. чрезмерно большое цветовое пространство. Использование границы XYZ в качестве оценки наиболее насыщенных цветов приводит к сдвигу некоторых цветов, много большему, чем необходимо. Можно рассчитать значения RGB цифрового проектора из значений DCDM X'Y'Z' для каждого пикселя фильма и найти один, находящийся на максимальном расстоянии от RPGB. Однако такой расчёт займёт крайне много времени и мало практичен. Если, однако, известны координаты цветности базиса мастеринг-проектора, сравнительно просто сопоставить их с координатами цветности базиса цифрового проектора в кинотеатре. Если базис мастеринг-проектора находится в границах гаммы кинотеатрального цифрового проектора, никакое согласование гамм не требуется. Если координаты цветности базиса мастеринг-проектора выходят далеко за гамму кинотеатрального проектора, может понадобиться существенное согласование гаммы. Таким образом, даже информация о расположении базисных цветов мастеринг-проектора может существенно помочь при выработке стратегии согласования гамм.

Преобразование между XYY, XYZ и X'Y'Z'

Поскольку кодирование и декодирование цветов и требования на цветовые допуски в спецификациях SMPTE для цифрового кинематографа основаны на системах CIE XYZ и CIE L*a*b*, этот и следующий разделы включены для полноты описания. По науке о цвете существует много публикаций [6,13-19], дающих больше информации для интересующихся этим вопросом.

Равенства 1-6 определили соотношение между координатами цвета XYZ и кодированными значениями DCDM X'Y'Z'. Однако измерительные приборы обычно дают координаты цветности x и y и яркость Y, а не значения XYZ. Приборы дают абсолютные значения яркости в кд/м², а не относительные значения Y, используемые при кодировании и декодировании (равенства 1-6). Следовательно, таблицы в SMPTE 431-2 определяют колориметрию в значениях xY, а не XYZ. Следующие равенства связывают координаты цветности xuy с координатами цвета XYZ:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Связь xuy и XYZ задаётся равенствами:

$$X = \left(\frac{x}{y}\right) * Y \quad Y = Y \quad z = 1 - x - y \quad Z = \left(\frac{z}{y}\right) * Y$$

В качестве конкретного рабочего примера расчёта значений X'Y'Z' из значений xuy рассмотрим подробно расчёт для белой точки. Согласно SMPTE 431-1 значения xuy для белого составляют (0.314 0.351 48.00). Из приведённых выше равенств получаем абсолютные значения XYZ:

$$X = \left(\frac{x}{y}\right) * Y = \left(\frac{0.314}{0.351}\right) * 48.00 = 42.940$$

$$Y = Y = 48.00$$

$$z = 1 - x - y = 1 - 0.314 - 0.351 = 0.335$$

$$Z = \left(\frac{z}{y}\right) * Y = \left(\frac{0.335}{0.351}\right) * 48.00 = 45.812$$

Для белого Y=48 кд/м², поэтому нормирующий коэффициент для получения нормированных значений XYZ равен 48. Следовательно, нормированные значения XYZ:

$$X = X / 48 = 42.940 / 48 = 0.894583$$

$$Y = Y / 48 = 48 / 48 = 1.000000$$

$$Z = Z / 48 = 45.812 / 48 = 0.954417$$

$$X' = \text{INT} \left(4095 * \left(\frac{L * X}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right) = \text{INT} \left(4095 * \left(\frac{48 * 0.894583}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right) = 3794$$

$$Y' = \text{INT} \left(4095 * \left(\frac{L * Y}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right) = \text{INT} \left(4095 * \left(\frac{48 * 1.000000}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right) = 3960$$

$$Z' = \text{INT} \left(4095 * \left(\frac{L * Z}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right) = \text{INT} \left(4095 * \left(\frac{48 * 0.954417}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right) = 3890$$

Описание пространства CIE L*a*b* и ΔE*ab

Параметром цветовой разности, определённым в цифровом кинематографе для цветных допусков, является ΔE*ab. Выражение для ΔE*ab основано на равенствах для L*a*b*, которые выводятся из цветных координат XYZ:

$$L^* = 116 * f(Y/Y_n) - 16$$

$$a^* = 500 * [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)]$$

$$b^* = 200 * [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)]$$

где

$$f(X/X_n) = (X/X_n)^{\frac{1}{3}} \text{ для } (X/X_n) > 0.008856$$

$$f(X/X_n) = 903.3 * (X/X_n) \text{ для } (X/X_n) \leq 0.008856$$

$$f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{\frac{1}{3}} \text{ для } (Y/Y_n) > 0.008856$$

$$f(Y/Y_n) = 903.3 * (Y/Y_n) \text{ для } (Y/Y_n) \leq 0.008856$$

$$f(Z/Z_n) = (Z/Z_n)^{\frac{1}{3}} \text{ для } (Z/Z_n) > 0.008856$$

$$f(Z/Z_n) = 903.3 * (Z/Z_n) \text{ для } (Z/Z_n) \leq 0.008856$$

и где XYZ – координаты цветного образца и X_n, Y_n, Z_n – координаты белого. В цифровом кинематографе абсолютные значения координат белого X_n, Y_n, Z_n равны 42.940, 48.000 и 45.812, а нормированные значения – 0.894583, 1.000000 и 0.954417, как было рассчитано выше. В равенствах для L*a*b* могут быть использованы и абсолютные и нормированные значения XYZ, т.к. все функции содержат отношения цветных координат.

Разница между двумя цветами ΔE*ab рассчитывается как евклидовое расстояние между точками в пространстве L*a*b*:

$$\Delta E^*ab = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Где для цветов 0 и 1:

$$\Delta L^* = L_1^* - L_0^*$$

$$\Delta a^* = a_1^* - a_0^*$$

$$\Delta b^* = b_1^* - b_0^*$$

Многие приборы, измеряющие значения XYZ, рассчитывают также ΔE*ab двух цветов при заданных значениях XYZ белого.

Таблица 4 содержит пример расчёта ΔE*ab образца с использованием приведённых выше равенств. Пусть ко-

Таблица 4. Пример расчёта XYZ по xyY и расчёта L*a*b* по XYZ для зелёного базисного проектора

Параметр	Значение 1	Значение 2	Значение 3
xyY	0.2650	0.6900	34.64
XYZ	13.30	34.64	2.26
L*a*b* ₀	88.0	-110.2	106.1
xyY	0.2719	0.6835	34.64
XYZ	13.78	34.64	2.26
L*a*b* ₁	88.0	-106.2	106.1
ΔE^*ab	4.0		
ΔxyY	0.0069	-0.0065	0.00

дированные значения (2417 3493 1222) (это кодированные значения базисного зелёного эталонного проектора) дают в этом примере значения xyY (0.2719 0.6835 34.64). Вопрос в том, будут ли эти измеренные значения в пределах допуска в 4 единицы ΔE^*ab от базисного зелёного эталонного проектора. В таблице 4 приведены результаты расчёта XYZ по xyY и расчёта L*a*b* по XYZ для базисного зелёного эталонного проектора и для измеренного базисного зелёного. По этим двум комплектам значений L*a*b* была рассчитана ΔE^*ab . В данном случае, ΔE^*ab в точности равна 4, и, следовательно, данный базисный зелёный находится в допустимых пределах [4].

Аналогично, вокруг каждого базисного цвета было рассчитано большое количество точек в пределах допуска $\Delta E^*ab=4$. Результаты расчёта приведены на рис. 5. Кроме того, на рис.5 изображён круг допустимых отклонений для светло-серого образца с координатами цветности белого и яркостью 40 кд/м². При расчётах рис. 5 предполагалось, что значения яркости одинаковы для всех образцов.

На рис. 5 показаны фигуры допуска $\Delta E^*ab=4$ вокруг базисных красного, зелёного и синего эталонного проектора и светло-серого цвета в предположении, что при расчёте фигур допуска яркость не изменяется. Фигура допуска базисного красного расположена рядом со спектральным локусом и настолько мала, что почти незаметна. На диаграмме a*b* круг в верхнем левом углу соответствует базисному зелёному, в верхнем правом углу – базисному красному, в нижнем правом углу – базисному синему, и круг в центре диаграммы соответствует светло-серому. Хотя цветовые отличия CIE Lab $\Delta E^*ab=4$ определяют на диаграмме a*b* окружность (в предположении неизменной яркости), и все окружности на диаграмме a*b* одного размера, фигуры допуска на диаграмме цветности – не окружности и имеют разный размер.

Хотя цветовые допуски, указанные в SMPTE 431-2, можно применять без знаний о пространстве CIE Lab, превышающих приведённые выше равенства, знание свойств пространства CIE Lab может улучшить понимание и измерение допусков. ΔE^*ab выбрана в качестве спецификации допуска, поскольку она определяется в цветовом пространстве CIE Lab. Самым полезным свойством этого пространства является его однородность, т.е. равные евклидовы расстояния в этом пространстве воспринимаются как равные цветовые отличия. Естественно, красный не похож на зелёный, но если два красных цвета отличаются на 2 единицы ΔE^*ab , и два зелёных цвета отличаются на 2 единицы ΔE^*ab , то эти цветовые отличия будут восприниматься равными. Это очень полезное свойство, когда цветовые допуски определяются в терминах евклидова пространства. Пространство цветности не так однородно, как CIE Lab; соответственно на диаграмме a*b* рисунка 5 круги допустимых отклонений имеют одинаковый размер, тогда как на диаграмме цветности xy фигуры допуска имеют разный размер.

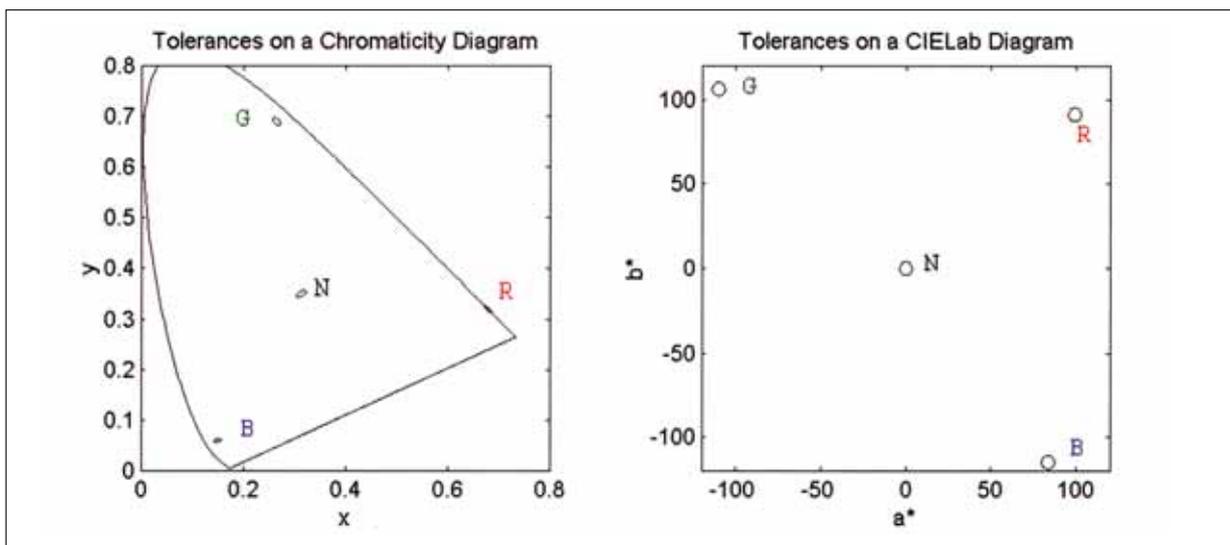


Рис. 5. Расчёт первоначального цвета красного, зелёного, синего и светло-зелёного и допустимые отклонения

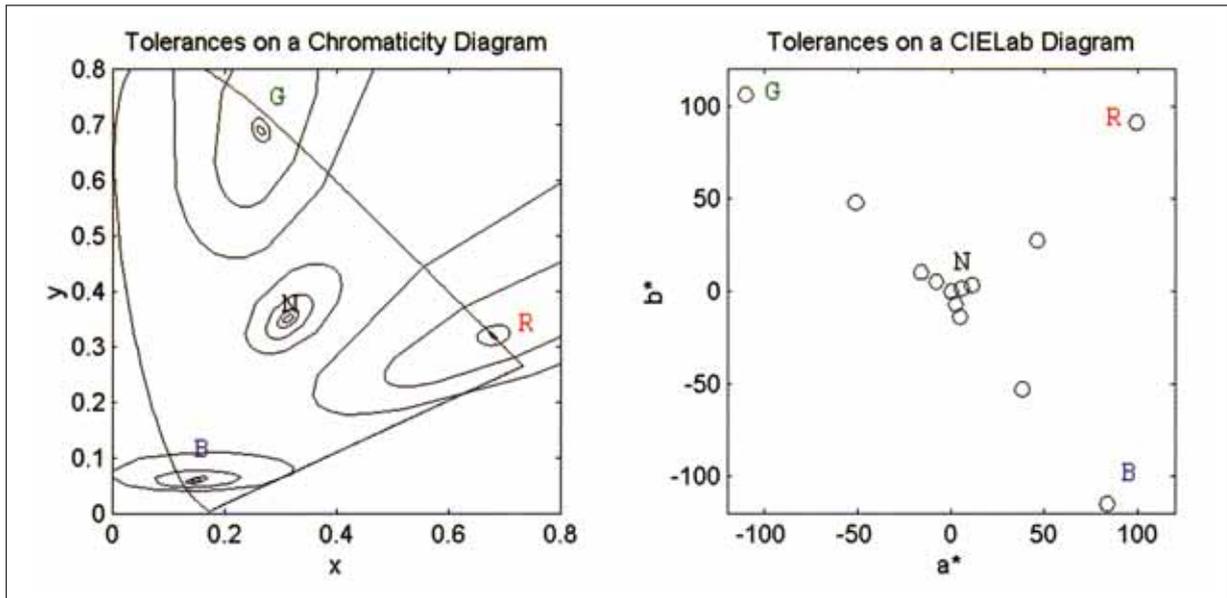


Рис. 6. Диаграмма цветности и фигуры допусков

Пространство CIE Lab не совершенно однородно, хотя оно достаточно однородно для большинства задач. Есть общее правило: при сравнении двух образцов, близких по цвету, близких к нейтрально серому и при ярко освещённом окружении – $\Delta E^*_{ab} = 1$ находится около порога зрительного цветового различения. При изменении любого из этих условий (например, изменилось окружение, цвета очень насыщены и далеки от нейтрального или образцы предъявляются последовательно с очень низкой частотой вместо одновременного показа) порог зрительного цветового разрешения возрастает. Это значит, что при любых подобных изменениях, чтобы увидеть цветовую разницу, ΔE^*_{ab} должна быть увеличена.

И, наоборот, для любых условий, отличающихся от данных, различие пары цветных образцов с заданным ΔE^*_{ab} будет казаться меньше. Для случая пары насыщенных цветов порог различимости цветовой разницы возрастает примерно до $\Delta E^*_{ab} = 2$. В результате, вследствие того, что уровень освещённости в кинотеатре много ниже, чем используемый при определении пространства CIE Lab, а также, поскольку цветовые различия определяются между цветами в одном кинотеатре с использованием одного проектора и в другом кинотеатре с использованием другого проектора, принятое $\Delta E^*_{ab} = 4$ является очень строгим допуском. На самом деле, очень немногие смогут уловить разницу между двумя цветами с $\Delta E^*_{ab} = 4$, проецируемыми в двух разных кинотеатрах.

На рис. 6 показаны некоторые другие отличия между пространством CIE Lab и пространством цветностей. На рис. 5 фигуры допуска рассчитаны для каждого из базисных цветов и для светло-серого при уровне освещённости 40 кд/м². Фигуры допуска на рис. 6 рассчитаны для четырёх различных значений освещённости. Первая

группа точно такая же, как на рис. 5. Во второй группе освещённость уменьшена до 10% от уровня первой группы. В третьей группе освещённость уменьшена до 1% и в четвёртой – до 0.5% от значений первой группы. Это эквивалентно ряду плотностей с одинаковыми координатами цветности x, y . В терминах науки о цвете это ряд насыщенности: различные значения Y при одинаковых значениях x, y .

Фигуры допуска на диаграмме цветности и диаграмме a^*b^* на рис. 6 демонстрируют некоторые интересные отличия. На диаграмме a^*b^* показано только 13 фигур допуска, вместо ожидаемых 16 цветов, представленных на диаграмме цветности. Четыре фигуры допуска вокруг светло-серого идентичны по форме и расположению и представлены одной окружностью вместо четырёх. На диаграмме a^*b^* фигура допуска вокруг нейтрального цвета будет идентична по форме и расположению независимо от яркости серого поля. На диаграмме цветности положение серого не зависит от яркости, но размер и форма фигуры допуска меняются: с уменьшением яркости размер фигуры допуска растёт.

На диаграмме a^*b^* вокруг каждого базисного цвета образовано по четыре окружности для четырёх уровней освещённости. Центры окружностей для каждого базисного цвета имеют разные значения a^*b^* ; они расположены на линии, соединяющей значение базисного цвета при максимальной яркости и нейтральную ось. Окружность, соответствующая образцу с яркостью 0.5% от максимальной, лежит ближе всего к нейтральной оси. На диаграмме цветности опорная точка фигур допуска имеет одинаковые x, y координаты независимо от уровня яркости. Однако тогда как все фигуры допуска на диаграмме a^*b^* являются окружностями с радиусом 4, фигуры допуска на диаграмме x, y увеличиваются

с уменьшением яркости. Из диаграммы ху видно, что часть некоторых фигур допуска выходит за границы спектрального локуса в область, где реальных цветов быть не может.

Тот факт, что существуют некоторые математические цвета, определяемые фигурами допуска, выходящие за пределы спектрального локуса, не очевиден из графиков CIE Lab. Фигуры допуска для значений яркости, меньших 0.5%, что соответствует контрасту 200:1, не приведены, поскольку фигуры допуска разных цветов на диаграмме цветности перекрываются. Отсюда вывод: хотя задание допуска ΔE^*_{ab} для цветов с низкой яркостью кажется правильным на диаграмме a^*b^* , диаграмма ху показывает, что некоторые из указанных цветов лежат вне спектрального локуса. Обе диаграм-

мы показывают, что при снижении яркости фигуры допуска начинают перекрываться. Это говорит о том, что при низких яркостях допуск ΔE^*_{ab} , возможно, не годится для оценки цветовых искажений, вносимых системой.

Выражение признательности

Данная статья основана на информации Инженерного Справочника SMPTE 432-1, «Обработка цвета для цифрового кинематографа», редактором которого был автор. Автор благодарит всех, внёсших вклад в создание Инженерного Справочника, за полезные и многочисленные предложения, направленные на его улучшение. Автор благодарит также фирму Eastman Kodak за поддержку данной работы. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. SMPTE 432-1, «Color Processing for D-Cinema», www.smpte.org.
2. SMPTE 422-1, «Digital Cinema Distribution Master (DCDM) – Image Characteristics», www.smpte.org.
3. SMPTE 431-1, «D-Cinema Exhibition Screen SLuminance Level, Chroaticity, and Uniformity», www.smpte.org.
4. SMPTE 431-2, «Reference Projector and Environment for Display of DCDM in Review Rooms and Theaters», www.smpte.org.
5. SMPTE 431-3, «Projection Image Measurements», www.smpte.org.
6. J. Silva, «Digital Cinema Image Representation Signal Flow», SMPTE Mot.Imag. J., 115:137-152, April 2006.
7. G.Kennel, Color and Mastering for Digital Cinema, Focal Press: New York, NY, 2007.
8. T. Maier, «Color Processing for Digital Cinema 1: Background, Encoding and Decoding Equations, Encoding Primaries, and the Exponent (1/2.6)», SMPTE Mot.Imag.J., 116: 439-446, Oct.2007.
9. T. Maier, «Color Processing for Digital Cinema 2: Explanation of the Constants 4095 and 52.37, the White Points, and the black», SMPTE Mot.Imag.J., 116: 447-455, Oct. 2007.
10. P.G.J. Barten, Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality, SPIE Optical Engineering Press;Bellingham, WA, 1999/
11. The following website has a very large list of references to published gamut mapping strategies: www.colour.org/tc8-03/survey/survey_index.html.
12. J.Morovic and M. R. Luo, «The Fundamentals of Gamut Mapping: A Survey», J.Imag.Sci.Tech., 45: 283-290, May/June 2001.
13. CIE Publication 15.2 (1986), Colorimetry, 2nd Edition, 1986.
14. CIE Publication 15.:2004, Colorimetry, 3rd Edition, 2004
15. R. S. Berns, Bilmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, 3rd Edition, John Wiley & Sons: New York, 2000.
16. R.W.G. Hunt, Measuring Colour, 3rd Edition, Fountain Press: New York, 1998.
17. R.W.G. Hunt, The Reproduction of Color, 6th Edition, John Wiley& Sons: New York, 2004.
18. J.Silva, «The Role of Transform Matrices in Digital Cinema», SMPTE Mot. Imag. J., 114: 402-414, Oct./Nov. 2005.
19. G. Wyszecki and W. S. Stiles, Color Science, Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd Edition, John Wiley& Sons: New York, 1982.



ОБРАБОТКА ЦВЕТА ДЛЯ ЦИФРОВОГО КИНЕМАТОГРАФА 4: измерения и допуски



Thomas O. Maier

COLOR PROCESSING FOR DIGITAL CINEMA 4: Measurements and Tolerances

■ Перевод В. Сычёва, к.т.н., ОАО «НИКФИ» ■

В данной, четвёртой в серии, статье обсуждается технология измерений, которая должна использоваться при измерении света, отражённого от кинотеатрального экрана. Приводятся также нормативные значения для каждого измерения и допустимые отклонения от них.

■ Измерение проецируемых изображений

Измерения и ожидаемые при проекции значения описаны в трёх документах SMPTE: 431-1 [3], 431-2 [4] и 431-3 [5]. Эти измерения используются, чтобы определить, соответствуют ли проектор и зал, в котором он установлен, ожидаемому и необходимому уровню для того, чтобы результаты воспроизведения любого контента на данном проекторе в данном зале были максимально близки к результатам воспроизведения этого контента на любом проекторе в соответствующем зале. В статье три указанных документа упоминаются как SMPTE 431.

SMPTE 431-1: «Уровень, цветность и однородность яркости экрана при цифровой кинопроекции» – стандарт, определяющий нормативные значения и допуски для уровня яркости экрана, цветности белого и однородности яркости и цветности проекционного света для демонстрации цифровых фильмов в просмотровых залах и коммерческих кинотеатрах. Поскольку восприятие цвета и контраста зависит от абсолютной яркости изображения, цель 431-1 состоит в достижении соответствия восприятия изображения такому уровню, какой был получен в процессе фильмопроизводства (mastering process).

SMPTE 431-2: «Эталонный проектор и окружение для демонстрации DCDM в просмотровых залах и кинотеатрах» – рекомендованная практика, определяющая характеристики эталонного проектора и его контролируемое окружение. Он определяет также допустимые отклонения критических параметров изображения для просмотровых залов и кинотеатров. Цель 431-2 состоит в обеспечении средств достижения согласования и воспроизводимости качества цветопередачи для всех изображений, проецируемых цифровыми средствами.

SMPTE 431-2 декларирует: «Эталонный проектор – практическое устройство». Не существует физического эталонного проектора как принятого эталона, в смысле первичного стандарта, с которым сравнивают все остальные устройства или материалы. Вместо этого стандартизуется устройство, определяемое своими характеристиками и возможностями, а не технологией изготовления. Вряд ли можно найти физическое устройство, в точности соответствующее характеристикам эталонного проектора. Однако есть много физических цифровых проекторов, соответствующих характеристикам эталонного проектора в пределах допустимых отклонений от нормативных характеристик. Следовательно, термин «эталонный проектор» относится к двум различным устройствам: (1) теоретическому устройству, в точности соответствующему характеристикам, заданным различными стандартами, и (2) любому физическому устройству, отвечающему характеристикам, определённым для теоретического эталонного проектора, в пределах заданных допусков.

SMPTE 431-3: «Измерение проецируемых изображений» – рекомендуемая практика, определяющая цветные образцы и изображения и описывающая, как измерить свет, отражённый от киноэкрана. Однако он не задаёт ожидаемых результатов измерения. Целью 431-3 является определение технологии измерений на киноэкране для того, чтобы можно было поддерживать правильные рабочие условия. Эти технологии не зависят от устройства проектора и не направлены на использование для оценки соответствия проектора заявленным в спецификации характеристикам. Когда SMPTE EG 432-1 и данная статья были уже написаны, SMPTE RP 431-3 был черновым документом. В сентябре 2007 г. комитет DC28

решил отказаться от RP 431-3, и он не станет Рекомендуемой Практикой. Однако схемы и технологии измерения, описанные в этом черновом документе по-прежнему применимы к цифровой кинопроекции. Поэтому, хотя RP 431-3 сейчас отклонён, описанные там измерения справедливы и полезны.

В следующих разделах описаны методы и ожидаемые результаты измерений, основанные на спецификациях трёх вышеназванных SMPTE 431 документов. Документы могут со временем измениться; поэтому перед проведением измерений или сравнением результатов измерений со значениями, приведёнными в данной статье, необходимо проверить в соответствующем документе, не изменились ли стандартные значения. Статья показывает, как можно использовать информацию в этих документах, и включает методы и ожидаемые результаты; однако они могут со временем меняться. Здесь рассматривается каждое измерение тестового образца и даётся его объяснение с использованием всех трёх документов SMPTE. Измерительное оборудование, расположение в кинозале точек измерения, окружение проектора и зала – одинаковы для всех измерений и тестовых образцов. Они будут объяснены в первую очередь, затем будут объяснены каждое измерение и тестовый образец.

Кодирование цвета прокатного цифрового мастера (DCDM) разработано таким образом, чтобы исключить цветовые артефакты. Рекомендуемые измерения и соответствующие допуски показывают, должным ли образом отображает система. Однако сохраняется вероятность, что система совершенно работает в контрольных точках измерения и, тем не менее, имеет заметные цветовые артефакты. Поэтому некоторые из рекомендованных измерений и тестов являются визуальными.

Некоторые таблицы в данном разделе скопированы прямо из документов SMPTE 431. Эти таблицы определяют допуски и имеют столбцы с названиями «Эталон», «Просмотровый зал» и «Кинозал» или очень похожими словами. Понятно, что для различных областей применения нормативов внутри индустрии нужны различные требования к допускам. Подходящие допуски следует выбирать, основываясь на области применения и необходимости различных проекторов соответствовать различным уровням точности. Чем жёстче допуски, тем точнее соответствие проецируемых изображений. Однако стоимость достижения и поддержания этих жёстких допусков должна быть уравновешена необходимостью такого точного соответствия. Для упрощения названия столбцов определяют различные уровни допусков. Эти названия означают:

Эталонный: желаемый уровень или значение параметра. Это значение, по отношению к которому определяются допуски.

Просмотровый зал: кинозал, в котором принимается решение о качестве изображения.

Кинотеатр: кинозал, в котором зрители смотрят изображение.

Измерительное оборудование

SMPTE 431-3 рекомендует только два типа измерений: яркости и цветности. Измерять яркость рекомендуется или фотометром, или спектрофотометром с кривой спектральной чувствительности стандартного наблюдателя (кривой видности), как определено в CIE S002. В CIE S002 содержится информация о двух колориметрических наблюдателях: 1931 наблюдатель (2-градусный) и 1964 наблюдатель (10-градусный).

Согласно SMPTE 431-3 измерение яркости должно производиться для 2-градусного наблюдателя. Измеритель должен иметь погрешность ± 0.5 кд/м² (± 0.2 fL) при измерении светлых полей и ± 0.07 кд/м² (± 0.02 fL) – при измерении тёмных. Цветность должна измеряться спектрофотометром с минимальной погрешностью ± 0.002 для координат цветности x и y при яркости более 10 кд/м². Измерители цветовой температуры имеют недостаточную точность ни для измерения яркости, ни для измерения цветности. Во всех случаях измеряется свет, отражённый от экрана. Т.е. измерительный инструмент должен быть направлен при измерении на экран.

Позиции измерения в просмотровом зале или кинозале

В просмотровом зале измерения рекомендуется проводить на высоте примерно 1.1 м (43 in.) над полом, на расстоянии 1.5÷3.5 высоты экрана от экрана, в том месте, где обычно сидит цветоустановщик.

В кинозале рекомендуется шесть позиций измерения: три в центральном ряду и три в последнем ряду кинотеатра. Три позиции в каждом ряду: крайнее левое, крайнее правое и центральное место. В каждой позиции рекомендуется располагать измерительное оборудование на высоте примерно 1.1 м над полом.

Окружение проектора и кинозала

Проектор должен быть установлен и пущен в эксплуатацию в соответствии со спецификацией производителя. Для выхода на стабильный режим проектор должен быть включён, по крайней мере, за 20 минут до проведения измерений. Источники света в зале должны быть выключены, за исключением освещения безопасности, чтобы обеспечить эквивалентность с условиями работы обычного кинотеатра. Проектор должен получать изображения, определяемые кодовыми значениями X'Y'Z', так чтобы тестировалась вся система целиком, от сервера до проектора. Некоторые проекторы содержат встроенные тесты. Хотя эти тесты могут быть очень полезны для каких-то испытаний, они не проверяют всю систему цифрового кинематографа, если сигналы X'Y'Z' не приходят от сервера.

Измерение внешнего света в кинозале

Эта мера света, отражённого от экрана, обусловленного дежурным освещением и подсветкой ступенек, но не самим проектором. Свет измеряется при нормальных

условиях демонстрации, но с выключенной или погашенной лампой проектора. Измерения производятся в центре экрана из позиций, определённых выше. Для просмотровых залов уровень внешнего света, отражённого от экрана, должен быть менее 0.01 кд/м² (0.0029 fL). Для кинотеатральных залов уровень внешнего света, отражённого от экрана, должен быть менее 0.03 кд/м² (0.01 fL). Инструкции безопасности и положение световых указателей выхода и доступа могут приводить к повышению уровня внешнего света; отметим, что это снижает контраст проецируемого изображения.

Измерение яркости белого

Для яркости белого существует два типа измерений. Абсолютная яркость измеряется в центре экрана. Однородность яркости определяется сравнением результатов измерений в центре и по краям экрана (в просмотровых и кинотеатральных залах) или в углах экрана (для просмотровых залов). Угловые точки расположены на расстоянии 5%±1% ширины экрана от обоих смежных краёв экрана. Краевые точки измерения расположены на равном расстоянии от двух смежных угловых точек. Кодированные значения X'Y'Z' белого равны (3794 3960 3890).

Нормативные значения яркости и допуски для просмотровых залов и кинотеатров приведены в таблице 1.

Нормативные значения цветности в центре экрана и допуски для просмотровых залов и кинотеатров приведены в таблице 2.

Допустимые отклонения для просмотровых залов и кинотеатров в углах экрана приведены в таблице 3.

Допуски для угловых точек установлены как отклонение от цветности в центре, поскольку для центральной точки определены свои, связанные с её цветностью, допуски. Чтобы экран казался насколько возможно однородным, лучше задать пределы отклонения углов от центра, чем от нормативного значения.

Хотя однородность яркости и однородность цветности определены в отношении центральной и дополнительных четырёх или восьми точек экрана, устанавливаются также, что они должны быть симметрично распределены относительно геометрического центра экрана и не иметь резких изменений. С некоторыми цифровыми проекторами бывают ситуации, когда свет в заданных точках экрана оказывается внутри допусков, а между этими точками могут получаться заметные отклонения цветности.

Таблица 1. Значения яркости белого

Параметр	Эталон	Допуски для просмотрового зала	Допуски для кинотеатра
Яркость в центре, 100% белый	48.0 кд/м ² (14.0 fL)	±3.5 кд/м ² (±1.00 fL)	±10.2 кд/м ² (±3.00 fL)
Яркость, края	85% от значения в центре	80% – 90% от значения в центре	75% – 90% от значения в центре
Яркость, углы	85% от значения в центре	80% - 90% от значения в центре	Не определены

Таблица 2. Значения цветности белого для центра экрана

Параметр	Эталон	Допуски для просмотрового зала	Допуски для кинотеатра
Цветность белого, центр	x=0.314 y=0.351	±0.002 x ±0.002 y	±0.006 x ±0.006 y

Таблица 3. Допуски на цветность белого для углов экрана

Параметр	Эталон	Допуски для просмотрового зала	Допуски для кинотеатра
Цветность белого, углы	±0,000 x ±0,000 y от значения в центре	±0,008 x ±0,008 y от значения в центре	±0,015 x ±0,015 y от значения в центре

Поэтому для уменьшения числа измерений и сложности определения серии измерений для установления проблемы, проще посмотреть на изображение белого поля на экране и выявить на нём видимые цветовые отклонения.

Измерение яркости «чёрного» в зале

Чёрный цвет в зале определяется как свет, отражённый от экрана, когда зал находится в нормальном рабочем режиме (при включённом дежурном освещении), проектор включён, и на него подан сигнал с очень низкими кодированными значениями. SMPTE 431-3 задаёт кодированные значения изображения, подаваемого на проектор при измерении «чёрного», равные (16 16 16). Используя равенства DCDM для декодирования сигнала яркости, получаем яркость 0.00003 кд/м² для кодированного значения 16. Проектор может (и, скорее всего, так и делает) давать некоторую засветку на экран даже при подаче кодированных значений (16 16 16). Поэтому яркость «чёрного» в зале будет обычно выше яркости внешнего света в кинозале. Прямых требований к уровню «чёрного» в зале нет. Однако, основываясь на спецификации яркости белого и последовательном контрасте (см. следующий раздел), можно рассчитать максимальную яркость «чёрного» в кинозале. Эти значения приведены в таблице 4.

Таблица 4. Максимальный уровень яркости чёрного в кинозале

Параметр	эталон	Допуски для просмотрового зала	Допуски для кинотеатра
Уровень чёрного в кинозале	0.024 кд/м ²	0.032 кд/м ²	0.040 кд/м ²

Таблица 5. Значения и допуски для последовательного контраста

Параметр	эталон	Допуски для просмотрового зала	Допуски для кинотеатра
Последовательный контраст	2000:1 минимум	1500:1 минимум	1200:1 минимум

Таблица 6. Значения и допуски для внутрикадрового контраста

Параметр	эталон	Допуски для просмотрового зала	Допуски для кинотеатра
Внутрикадровый контраст	150:1 минимум	100:1 минимум	100:1 минимум

Таблица 7. Кодированные значения, яркость и координаты цветности тестового серого ступенчатого клина от чёрного к белому

№	Входные кодированные значения			Выходные координаты цветности		Выходная яркость Y, кд/м ²
	X'	Y'	Z'	x	y	
1	379	396	389	0.314	0.351	0.12
2	759	792	778	0.314	0.351	0.73
3	1138	1188	1167	0.314	0.351	2.10
4	1518	1584	1556	0.314	0.351	4.43
5	1897	1980	1945	0.314	0.351	7.92
6	2276	2376	2334	0.314	0.351	12.72
7	2656	2772	2723	0.314	0.351	18.99
8	3035	3168	3112	0.314	0.351	26.87
9	3415	3564	3501	0.314	0.351	36.50
10	3794	3960	3890	0.314	0.351	48.00

Измерение последовательного контраста

Последовательный контраст – это отношение яркости белого к яркости «чёрного» в зале. Требования к последовательному контрасту и соответствующим допускам приведены в таблице 5.

Измерение внутрикадрового (шахматного) контраста

Внутрикадровый контраст измеряется с помощью шахматной таблицы 4x4 с переменными белыми и чёрными полями. Кодированные значения для белых и чёрных полей равны, соответственно, (3794 3960 3890) и (16 16 16). Внутрикадровый контраст рассчитывается как сум-

ма яркостей белых полей, делённая на сумму яркостей чёрных полей. Требования к внутрикадровому контрасту и соответствующим допускам приведены в таблице 6.

Визуальная проверка воспроизведения серой шкалы

Видимость нейтральной шкалы во всём диапазоне яркостей проектора существенна при показе изображений высокого качества. Установлено, что визуальная оценка нейтральности шкалы от белого до чёрного является лучшим тестом на нейтральность, чем любые другие измерения. Поэтому визуальный тест рекомендуется для проверки воспроизведения серой шкалы.

Восприятие серого зависит от цвета и яркости окружающего фона. Поэтому при оценке воспроизведения серой шкалы координаты цветности фона устанавливаются такими же, как у белой точки проектора. Рекомендованы две серые шкалы: от чёрного к белому и от чёрного к тёмно-серому. Две шкалы необходимы, так как сложно оценивать тёмно-серые поля при наличии ярких белых. У шкалы от чёрного к белому яркость фона составляет 4.8 кд/м² (кодированные значения (1565 1633 1604)) над уровнем «чёрного» кинозала; шкала от чёрного к тёмно-серому имеет яркость фона 0.0064 кд/м² (кодированные значения (122 128 125)).

Рекомендуется тест серой шкалы располагать по центру экрана; тест должен представлять прямоугольник высотой 20% высоты экрана и 80% ширины экрана. Каждое поле должно составлять 8% ширины экрана. Поля шкалы от чёрного к белому определяются кодированными значениями согласно таблице 7. Поля шкалы от чёрного к тёмно-серому определяются кодированными значениями согласно таблице 8.

Хотя это визуальная проверка воспроизведения серой шкалы, таблицы 7 и 8 задают значения координат цветности и яркости каждого поля. Примеры изображений этих двух тестов показаны на рисунках 1 и 2.

Хотя эти таблицы скопированы из SMPTE 431-2, они слегка модифицированы. Значения яркости в таблицах 7 и 8 можно вычислить по значениям Y'. Поэтому если измерение значений яркости должны производиться в конкретном кинотеатре, к значениям яркости, приведённым в этих двух таблицах, нужно добавить яркость «чёрно-

Таблица 8. Кодированные значения, яркость и координаты цветности тестового серого ступенчатого клина от чёрного к тёмно-серому

№	Входные кодированные значения			Выходные координаты цветности		Выходная яркость
	X'	Y'	Z'	x	y	Y, кд/м ²
1	122	128	125	0.314	0.351	0.006
2	245	255	251	0.314	0.351	0.038
3	367	383	376	0.314	0.351	0.111
4	490	511	502	0.314	0.351	0.234
5	612	639	627	0.314	0.351	0.418
6	734	766	753	0.314	0.351	0.670
7	857	894	878	0.314	0.351	1.002
8	979	1022	1004	0.314	0.351	1.418
9	1101	1150	1129	0.314	0.351	1.928
10	1224	1277	1255	0.314	0.351	2.531

го» кинозала, чтобы рассчитать ожидаемые результаты измерения яркости. Измерения должны производиться в центре каждого серого поля. В таблицах SMPTE 431-2 значения яркости получены добавлением уровня «чёрного» кинозала 0.02 кд/м² к значениям яркости, рассчитанным из значений Y', поскольку в 431-2 предполагается последовательный контраст 2000:1.

Визуальная оценка появления ложных контуров

Ложные контуры – это появление ступеней или зон там, где должен быть постоянный или гладкий градиент. Контуры являются функцией многих переменных, и важно иметь серию тестов с малыми градациями, чтобы воспроизвести различные ситуации, естественно возникающие в изображениях. В качестве примеров можно привести небесный горизонт, особенно на восходе и закате солнца, а также естественное снижение яркости вокруг интенсивных источников света, особенно при атмосферном рассеянии или линзовой фильтрации. Эти тестовые клинья должны иметь глубину шага не менее четырёх пикселей с единичным приращением кодиро-



Рис. 1. Пример тестового серого ступенчатого клина от чёрного к белому



Рис. 2. Пример тестового серого ступенчатого клина от чёрного к темно-серому

ванного значения на шаг, и должны располагаться на фоне, равном минимальному значению клина, так чтобы глаз был адаптирован на максимальную чувствительность.

Оценка этого артефакта производится визуально. Нужно рассматривать каждое изображение или последовательность изображений с нормального расстояния и при нормальных рабочих условиях и установить, есть ли заметные контуры (пороги яркости) или цветовые отклонения от серого.

При создании контента широко используется динамическое затемнение до чёрного. Документы SMPTE 431 не предлагают каких-либо особых тестов для динамического затемнения; однако клина, начинающегося так, как описано выше, с медленно умень-

шающимися затем кодированными значениями, было бы вполне достаточно. Практически, наблюдатель смотрит динамическое затемнение и регистрирует появление нейтральных цветов в серии гаснущих изображений.

Измерение показателя степени функции передачи

Показатель степени функции передачи управляет контрастом проецируемого изображения, который является важной частью общего качества изображения. Допуски на показатель степени функции передачи разработаны таким образом, чтобы позволить некоторые отклонения в системе, не приводящие к серьезному ухудшению качества изображения. Настоящий раздел описывает, как измерить показатель степени функции передачи. Декодирующее равенство для яркости:

$$Y = \left(\frac{52,37}{L} \right) * \left(\frac{Y'}{4095} \right)^{2,6}$$

где Y' – кодированное значение DCDM для яркости, Y – яркость, и L = 48.00. Это равенство можно переписать как: $\log(Y) = 2.6 * \log(Y') - 2.6 * \log(4095) + \log(52.37/L)$

Или, упрощая: $\log(Y) = 2.6 * \log(Y') - K$

Значение K несущественно в данном тесте. Если, к примеру, проецировать серию кадров от белого к чёрному, цвета которых определены таблицей 7, и для каждого кадра измерять значения яркости, график зависимости $\log(Y)$ от $\log(Y')$ должен дать прямую линию с наклоном 2.6. Поскольку значения X'Y'Z' определяют триаду цветов над уровнем «чёрного» зала, яркость «чёрного» должна быть вычтена из каждого замера яркости перед логарифмированием. В таблице 9 приведены номинальные значения наклона и допустимые отклонения, как в процентах согласно SMPTE 431-2, так и в абсолютных значениях, для просмотровых залов и кинотеатров.

Таблица 9. Оптимальные значения показателя степени функции преобразования и допуски для просмотровых залов и кинотеатров

Параметры изображения	Номинальное значение (эталонный проектор)	Допуски (просмотровый зал)	Допуски (кинотеатр)
Показатель степени	2.6	±2%	±5%
Показатель степени	2.6	От 2.548 до 2.652	От 2.47 до 2.73

Таблица 10. Кодированные значения, яркость и координаты цветности базиса RGB

Базисный цвет	Кодированные значения			Координаты цветности		яркость Y, кд/м ²
	X'	Y'	Z'	x	y	
Красный	2901	2171	0	0.6800	0.3200	10.06
Зелёный	2417	3493	1222	0.2650	0.6900	34.64
Голубой	2014	1416	3816	0.1500	0.0600	3.31

Таблица 11. Кодированные значения, яркость и координаты цветности цветных образцов для контроля точности цветовоспроизведения

Образец	Входные кодированные значения			Выходные координаты цветности		Выходная яркость Y, кд/м ²
	X'	Y'	Z'	x	y	
Красный-1	2901	2171	100	0.6799	0.3200	10.06
Зелёный-1	2417	3493	1222	0.2650	0.6900	34.64
Синий-1	2014	1416	3816	0.1500	0.0600	3.31
Голубой-1	2911	3618	3890	0.2048	0.3602	37.95
Пурпурный-1	3289	2421	3814	0.3424	0.1544	13.35
Жёлтый-1	3494	3853	1221	0.4248	0.5476	44.70
Красный-2	2738	2171	1233	0.5980	0.3269	10.06
Зелёный-2	2767	3493	2325	0.2884	0.5282	34.64
Синий-2	1800	1416	3203	0.1664	0.0891	3.31
Голубой-2	3085	3590	3756	0.2409	0.3572	37.19
Пурпурный-2	3062	2421	3497	0.3382	0.1838	13.35
Жёлтый-2	3461	3777	2065	0.3973	0.4989	42.44

Измерение цветовой гаммы (первичных цветов)

При аддитивном синтезе цветовая гамма определяется координатами цветности и значениями яркости трёх базисных цветов, белого и чёрного. Уровни белого и чёрного в зале были описаны выше. Минимальный комплект первичных цветов приведён в таблице 10.

На практике проектор может иметь и большую цветовую гамму при использовании другого базиса, а также проектор может иметь координаты цветности и значения яркости при кодированных значениях таблицы 10 в пределах цветовых допусков, указанных ниже. Рекомендуется производить измерение координат цветности и зна-

чения яркости в центре экрана при полнокадровой проекции кодированных значений цветового базиса. Таблица 10, так же как таблицы 7 и 8, показывает значения яркости, рассчитанные по значениям Y', и не включающие уровень чёрного. Таблица 10 получена из таблицы A.4 в RP 431-2, за исключением того, что в таблице 10 кодированное значение Z' изменено на 0 для базисного красного. Нулевое значение технически правильно для кодированного значения базисного красного Z'. Причина использования значения 100 для Z' в таблице A.4 состояла в том, что некоторые устройства не пропускали нулевого кодированного значения, и было принято компромиссное значение 100. Кодированные значения X'Y'Z' (2901 2171 1000) кодируют координаты цветности (0.6799 0.3200). Разница в 0.0001 значительно ниже точности аппаратного измерения и человеческого восприятия и не имеет практического значения.

Задание точности цветового воспроизведения

В пределах минимальной цветовой гаммы, заданной для эталонного проектора, все цвета должны воспроизводиться с точностью $4\Delta E^*ab$. Обсуждение ΔE^*ab было дано в предыдущей статье [9]. Теоретически это требование относится ко всем цветам; однако на практике нереально вывести на экран и измерить все возможные цвета, которые могут быть закодированы равенствами цветового кодирования DCDM и воспроизведены эталонным проектором. По-

этому в таблице 11 приведены наборы цветов, которые могут быть использованы для проверки точности цветовоспроизведения системы. Предполагается, что если эти цвета находятся в допустимых пределах, то и все остальные цвета, скорее всего, окажутся также в допустимых пределах. Нейтральные цвета с 6 по 10 в таблице 7 также могут быть использованы для проверки точности цветовоспроизведения любого проектора в его окружении. Как и раньше, значения яркости в таблице 11 рассчитаны по значениям Y' и не включают уровень чёрного. Пример тестового изображения приведен на рисунке 3.

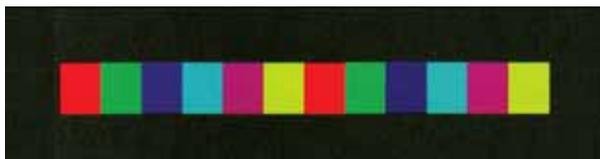


Рис. 3. Пример комплекта цветных образцов для контроля точности цветовоспроизведения

Выражение признательности

Данная статья основана на информации Инженерного Справочника SMPTE 432-1, «Обработка цвета для цифрового кинематографа», редактором которого был автор. Автор благодарит всех, внёсших вклад в создание Инженерного Справочника за полезные и многочисленные предложения, направленные на его улучшение. Автор благодарит также фирму Eastman Kodak за поддержку данной работы.

Словарь используемых терминов:

Ambient light – внешний свет, отражённый от экрана кинотеатра, исходящий от источников, не связанных с проектором, таких как указатели выхода, подсветка ступеней и т.п.

Clip – обрезание, стратегия согласования цветовой гаммы, при которой значениям цветовых координат, меньших минимально допустимого, присваивается минимально допустимое значение, а значениям, большим максимально допустимого, присваивается максимально допустимое значение.

Color decoding – декодирование цвета, преобразование целых чисел, являющихся кодированными значениями цвета, в цветовую информацию.

Color encoding – кодирование цвета, преобразование цветовой информации в целые числа, являющиеся кодированными значениями цвета.

Color gamut – цветовая гамма, граница цветов, которые могут быть воспроизведены системой.

Contouring – оконтуривание, артефакт, проявляющийся в появлении в изображении ступеней там, где должно быть равномерное или плавно изменяющееся поле.

Digital Cinema Distribution Master (DCDM) – прокатная цифровая копия, некомпьютеризованное цифровое представ-

ление контента кинофильма, подготовленное к отправке в цифровые кинотеатры.

Gamut Mapping – согласование цветовой гаммы, необходимое при невозможности воспроизведения каких-либо цветов средствами данного аддитивного синтеза. Иными словами, сжатие цветовой гаммы цифрового оригинала до цветовой гаммы, определяемой базисными цветами данного синтеза.

HVDLT (Human Vision Delta Luminance Threshold) – пороговое приращение яркости, минимальное изменение яркости, правильно идентифицируемое наблюдателями в 50% случаях.

HVMT (Human Vision Modulation Threshold) – пороговая модуляция, минимальная модуляция, правильно идентифицируемая наблюдателями в 50% случаях.

Lut (Look-up table) – табличная функция, распространённый способ быстрой компьютерной обработки, при котором входному значению по таблице определяется соответствующее выходное.

Mastering Projector – мастеринг-проектор, на котором готовился и контролировался цифровой оригинал.

Normalized Primary Matrix (NPM) – нормированная матрица базиса, используемая для преобразования линейных RGB в координаты XYZ. Матрица называется нормированной, поскольку сумма коэффициентов второго ряда равна 1.

Primary – базисный цвет, один из трёх основных цветов данного аддитивного синтеза, образующих базис соответствующего цветового пространства RGB. В тексте переведено, как «базисный цвет», т.к. это понятие точнее отражает математическую суть термина.

Primaries – базис цветового пространства RGB данного аддитивного синтеза.

Reference Projector – эталонный проектор, идеальное устройство, имеющее номинальные параметры качества, определённые SMPTE RP 431-2.

Reference Projector Gamut Boundary (RPGGB) – граница цветовой гаммы эталонного проектора.

Theatre Black – уровень чёрного. Свет, отражённый от экрана в кинозале, обусловленный внешними источниками (указатели выхода, подсветка ступенек) и проекционной системой при подаче на неё минимальных кодированных значений. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. SMPTE 432-1, «Color Processing for D-Cinema», www.smpte.org.
2. SMPTE 428-1, «Digital Cinema Distribution Master (DCDM) – Image Characteristics», www.smpte.org.
3. SMPTE 431-1, «D-Cinema Exhibition Screen SLuminance Level, Chroaticity, and Uniformity», www.smpte.org.
4. SMPTE 431-2, «Reference Projector and Environment for Display of DCDM in Review Rooms and Theaters», www.smpte.org.
5. SMPTE 431-3, «Projection Image Measurements», www.smpte.org.
6. J. Silva, «Digital Cinema Image Representation Signal Flow», SMPTE Mot. Imaq. J., 115:137-152, April 2006.
7. G. Kennel, Color and Mastering for Digital Cinema, Focal Press: New York, NY, 2007.
8. CIE Publication S002-1986, CIE Colorimetric Observers, 1986.
9. T. Maier, «Color Processing for Digital Cinema 3: Minimum Linear Bit Depth, Encoding of Near Blacks, Gamut Mapping, and Colorimetry for the Tolerances in the Standards», SMPTE Mot. Imaq. J., published in this issue.