

PRINCIPLES  
OF HOLOGRAPHY

V. V. SLABKO

*On the basis of monochromatic planar electromagnetic wave approximation, the fundamental principles of holography are explained. The classification of holographic techniques of recording, reproducing and the processing of wave fields and examples of holography application in different areas of science and technology are given.*

**На основе приближения монохроматической плоской электромагнитной волны в доступной форме изложены основные принципы голографии. Дана классификация голографических методов записи, воспроизведения и обработки волновых полей. Приведены примеры использования голографии в различных областях науки и техники.**

© Слабко В.В., 1997

**ПРИНЦИПЫ ГОЛОГРАФИИ**

В. В. СЛАБКО

Красноярский государственный технический университет

**ВВЕДЕНИЕ**

Оптика – раздел физики, в котором изучаются оптическое излучение (свет), его распространение и явления, наблюдаемые при взаимодействии света с веществом, – относится к числу наиболее старых и хорошо освоенных областей науки. Интерес к оптическим явлениям понятен. Около 80–85% информации об окружающем мире человек получает через зрение. Оптические явления воспринимаются совершенным оптическим прибором – человеческим глазом, являющимся основным орудием познания мира. Оптические явления всегда наглядны и поддаются количественному анализу. Очень многие основополагающие понятия, такие, как интерференция, дифракция, поляризация и др., пришли в физику из оптики и в настоящее время широко используются в областях, далеких от оптики, благодаря их предметной наглядности и отточенности теоретических представлений.

Примерно до середины XX столетия казалось, что оптика как наука закончила развитие. Однако в последние десятилетия в этой области физики произошли революционные изменения, связанные как с открытием новых закономерностей (принципы квантового усиления, лазеры), так и с развитием идей, основанных на классических и хорошо проверенных представлениях. Здесь прежде всего имеется в виду голография, которая значительно расширяет область практического использования волновых явлений и дает толчок теоретическим исследованиям.

**ПРИНЦИПЫ ОПТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ. ГОЛОГРАММЫ ГАБОРА И ДЕНИСЮКА**

Термин “голография” (от греч. *hólos* – весь и *gráphō* – пишу) был введен Денисом Габором для обозначения метода фотографической точной записи воспроизведения и преобразования волновых полей, предложенного им в 1948 году. Прежде чем излагать основные принципы голографии, рассмотрим подробнее, какие параметры электромагнитной волны ответственны за те самые 80–85% информации, которые воспринимаются зрением. Здесь и далее, за исключением специально оговоренных случаев, будем пользоваться некоторой идеализацией реального оптического излучения, которую будем называть монохроматической плоской электромагнитной волной (МПЭВ). Смысл МПЭВ поясним в процессе изложения.

Зависимость от координаты  $x$  и времени  $t$  напряженности электрического (магнитного) поля  $E$

в такой волне описывается простым гармоническим законом

$$E = E_0 \cos(\omega t - Kx + \varphi_0). \quad (1)$$

Здесь  $E_0$  — амплитуда электрического поля,  $\omega$  — циклическая частота, связанная с обычной частотой  $\nu$ , выраженной в герцах, соотношением

$$\omega = 2\pi\nu. \quad (2)$$

Волновой вектор  $K$  выражается через длину волны  $\lambda$ :

$$K = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

частота  $\nu$ , длина волны  $\lambda$  и скорость света  $C$  связаны соотношением

$$\lambda = \frac{C}{\nu}.$$

Величина, стоящая в круглых скобках в выражении (1), называется фазой волны, а  $\varphi_0$  — начальная фаза, которая определяется выбором начала отсчета времени.

Амплитуда электрического поля  $E_0$  определяет яркость (освещенность) рассматриваемого предмета. При этом

$$(E_0)^2 \approx I, \quad (4)$$

где  $I$  — интенсивность света, обозначающая мощность светового излучения, проходящего через единицу поверхности. Таким образом,  $E_0$  является первым параметром, который несет информацию о предмете. Вторым параметром МПЭВ, несущим информацию о предмете, является частота (цвет). Волна с определенным значением  $\omega = \omega_0$  называется монохроматичной (одноцветной).

Введенное соотношением (1) понятие монохроматичной плоской электромагнитной волны означает следующее. Напряженность электрического поля зависит только от одной пространственной координаты  $x$ . Во всех точках плоскости, перпендикулярной оси  $x$ , значение  $E$  одинаково. Это и есть плоская волна. Оптическая система глаза фокусирует излучение плоской волны в виде точки на сетчатке глаза. Если рассматривать предмет, то каждая точка этого предмета излучает волну, которую на достаточно большом удалении можно считать плоской. Таким образом, все точки предмета отображаются в виде точек на сетчатке глаза, что и дает его плоское изображение.

В реальной ситуации напряженность электрического поля зависит не только от  $x$ , но и от других пространственных координат  $y$  и  $z$  достаточно сложным образом. Эта зависимость определяется распределением излучающих свет источников. Кроме того, набор частот реальных источников света не ограничен одним значением, а захватывает некоторый частотный диапазон (немонохроматичность). Однако в большинстве реально встречающихся си-

туаций для оптического излучения справедлив принцип суперпозиции, что позволяет разложить любые волновые поля на бесконечную сумму плоских монохроматических волн вида (1). Таким образом, принцип суперпозиции позволяет рассматривать отдельно любую из плоских монохроматических компонент в отдельности, а общее волновое поле получать путем сложения плоских волн.

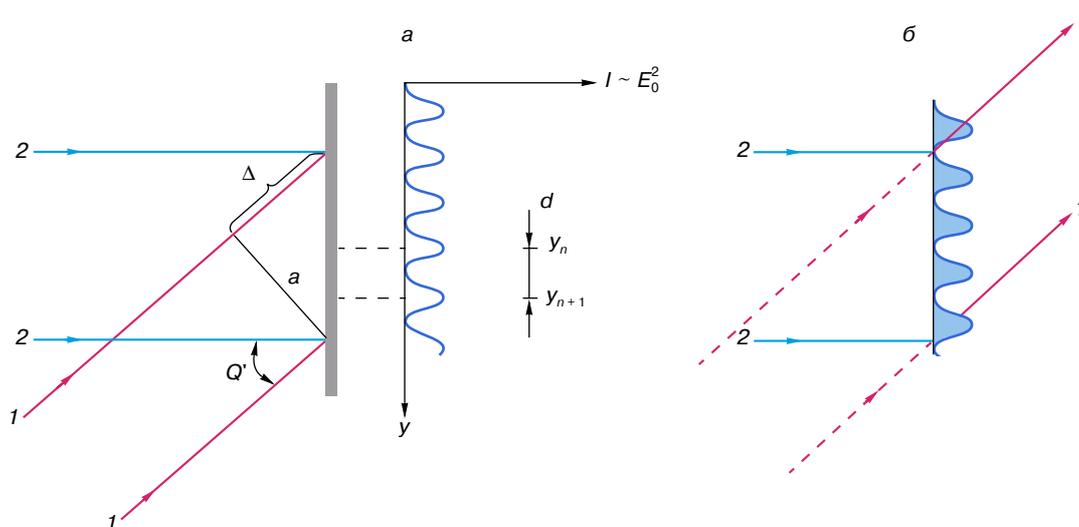
Итак, глазом воспринимаются только три параметра: интенсивность  $\approx E^2$ , цвет ( $\nu$ ), направление распространения МПЭВ.

Та часть информации, которая связана с членом  $Kx$  в (1), глазом не воспринимается. Поскольку в произведение входит координата  $x$ , то есть расстояние от точки предмета до глаза, то мы не можем воспринять разницу расстояний до двух разных точек предмета. Конечно, это относится только к двум точкам, которые удалены от глаза на не слишком большое расстояние. Кроме того, у нас есть два глаза и изображение предмета в каждом получается хоть и плоским, но воспринятым разнесенными в пространстве глазами. Это дает ощущение объемности предмета (стереоэффект). Подчеркнем, однако, что ощущение объемности скорее проявление аналитической способности нашего мозга, чем способности воспринять объем глазом как оптическим инструментом.

Парадоксально, но природа в процессе эволюции не выработала механизма, позволяющего фиксировать органами зрения фазу, в которой заключена огромная часть информации об объеме предмета и большую часть которой мы теряем. По-видимому, это целесообразно. Ведь длины волн видимого диапазона лежат в пределах от 0,4 до 0,7 мкм. Это означает, что любой фазочувствительный метод позволял бы различать расстояния с той же точностью. Такая точность просто не нужна для нормальной жизнедеятельности, и, кроме того, построить фазочувствительный аппарат непросто, хотя и возможно. Такие построенные на основе эффекта интерференции приборы называются интерферометрами.

Этот же эффект лежит и в основе голографии. Прежде всего вспомним само понятие интерференции. Под интерференцией волн понимается взаимное усиление или ослабление волн при их наложении друг на друга при одновременном распространении в пространстве.

Попробуем уяснить принципы голографии сначала на простейшем примере. Пусть у нас есть две МПЭВ, такие, что частоты их одинаковы, векторы электрических полей лежат в одной плоскости, а направления их распространения отличаются на угол  $Q'$ . В пространстве эти волны создадут интерференционную картину, при этом максимум интенсивности будет соответствовать поверхностям, на которых фазы обоих полей либо одинаковы, либо отличаются на  $2\pi$ .



**Рис. 1.** Схема записи (а) и восстановления плоской волны (б): 1 – предметная волна, 2 – опорная волна,  $Q'$  – угол падения предметной волны,  $A$  – плоскость фотопластины,  $d$  – расстояние между максимумами интерференционной картины,  $y_n, y_{n-1}$  – координаты максимумов по оси  $y$

Рассмотрим простейший пример (рис. 1, а). Волна 1, которую будем называть предметной, распространяется под углом  $Q'$  к перпендикуляру, восстановленному к плоскости  $A$ . Волна 2 распространяется перпендикулярно этой поверхности и будет называться опорной. В результате интерференции этих волн на плоскости будет наблюдаться интерференционная картина, представляющая собой чередование равностоящих друг от друга параллельных полос с максимальной и минимальной интенсивностью. Пространственный период этой картины, или расстояние между максимумами (минимумами), определяется разностью хода между участками волнового фронта в волнах 1 и 2. Введем в плоскости  $A$  ось  $y$ , лежащую также и в плоскости рис. 1, а. Поверхность одинаковой фазы в волне 2 совпадает с плоскостью  $A$ . Сечение поверхности одинаковой фазы в волне 1 плоскостью рисунка совпадает с отрезком  $a$ . Тогда разность хода  $\Delta$  в точке плоскости  $A$  с координатой  $y_1$  (см. рис. 1)

$$\Delta = y_1 \sin Q' . \tag{5}$$

Максимум интенсивности интерференционной картины в плоскости  $A$  соответствует значениям  $\Delta = 0 \pm n\lambda$ , где  $n$  – целое число. Расстояние  $d$  между максимумами

$$d = y_n - y_{n-1} = \frac{\lambda}{\sin Q'}. \tag{6}$$

Поместим в плоскости  $A$  фотопластинку и засветим ее. При правильном выборе экспозиции и режима обработки (проявление и закрепление) мы получим на пластинке изображение интерференционных равностоящих полос с большим пропусканием света в минимумах картины и меньшим в мак-

симумах. Полученный фотоснимок представляет собой дифракционную решетку с периодом  $d$ . Осветим эту решетку опорным излучением (волна 2) (см. рис. 1, б). В результате дифракции опорного пучка на решетке с синусоидальным пропусканием возникают несколько волн. При этом нас интересует только одна волна, которая дифрагирует в направлении, соответствующем главному максимуму дифракции ( $m = 1$ ). Ее направление определяется условием

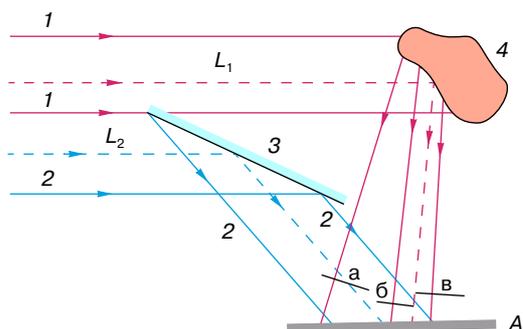
$$d \sin Q = \lambda . \tag{7}$$

Сравнение (7) с выражением (6) для периода дифракционной решетки дает  $Q' = Q$ . То есть свет на нашей решетке дифрагирует под углом  $Q'$ , что аналогично восстановлению предметной волны. Таким образом, фотографическая запись интерференционной картины двух плоских волн при последующем освещении изображения опорной волной позволяет восстановить другую, предметную.

Проведенное рассмотрение на первый взгляд относится только к интерференции МПЭВ. В действительности все значительно сложнее, но может быть понято на основе рассмотренной нами идеализации МПЭВ.

Рассмотрим процесс записи и считывания голограмм на примере схемы, изображенной на рис. 2 и получившей широкое распространение благодаря наглядности и простоте, а в основном благодаря тому, что в руках исследователей появился уникальный инструмент – лазер.

При освещении любого сколь угодно сложного предмета излучением каждая точка предмета является источником вторичных (отраженных) волн, и на достаточно больших расстояниях от предмета,



**Рис. 2.** Схема голографической записи изображения: 1 – излучение лазера в виде МПЭВ, 2 – опорный пучок, 3 – зеркало, 4 – предмет, А – плоскость пластинки, а–в – волновые поверхности рассеянного излучения,  $L_1$ ,  $L_2$  – длины хода опорного и предметного лучей (указаны штриховой линией)

значительно больших, чем размеры фотопластинки, эти волны хорошо могут быть представлены в виде плоских волн (см. рис. 2). При этом каждой точке на предмете будет соответствовать МПЭВ со своим углом падения  $Q'$  на пластинку. Если плоскость фотопластинки осветить частью излучения, которое использовалось для освещения предмета (опорный пучок), то на ней образуется система полос интерференции опорного пучка и пучков, испущенных каждой точкой предмета.

Теперь достаточно экспонировать (засветить) фотопластинку и обработать химически (проявить и закрепить), для того чтобы получить голограмму нашего предмета. Голограмма эта не имеет ничего общего с фотографией, полученной обычным способом. Мы не сможем в обычном свете рассмотреть на ней ничего, кроме беспорядочной на первый взгляд картины чередования областей с различным пропусканием. Для чтения голограммы нужен опорный пучок 2, точно такой же, как и тот, что использовался и при записи. При освещении опорным пучком на каждой из совокупности записанных дифракционных решеток восстанавливается своя предметная волна, соответствующая определенной точке предмета. Поэтому, помещая глаз в любой точке пространства за голограммой, можно наблюдать совокупность изображений всех этих точек. При этом предмет воспринимается как объемное образование, потому что, перемещая глаз в плоскости, параллельной голограмме, можно видеть его изображение, которое мы смогли бы видеть рассматривая не голограмму, а оригинал.

Необходимо отметить несколько очень важных свойств голографического способа записи информации.

1. Голографический способ записи изображения чувствителен к фазам предметных волн, поэтому в голограмме содержится информация о расстоянии любой точки предмета до фотопластинки, то есть об

аргументе в выражении (1). Это позволяет передавать объемность предмета. На пластинке с размерами, близкими к размерам обычной фотографии, содержится информация о бесчисленном множестве изображений предмета, соответствующих его наблюдению с разных точек.

2. Чувствительность метода к фазам предметной волны обусловлена прежде всего тем, что записывается картина интерференции этой волны с опорной, фаза которой известна.

3. Восстановление предметной волны возможно с любого малого участка голограммы. При этом, чем больше размер участка, тем большая четкость изображения возможна.

Остановимся теперь на условиях, при которых голограмма может быть записана. Вернемся к рис. 2. Из-за разности хода опорной и предметной волн на фотопластинке интерферирует свет, испущенный источником в различные моменты времени, разность которых достаточно просто оценить:

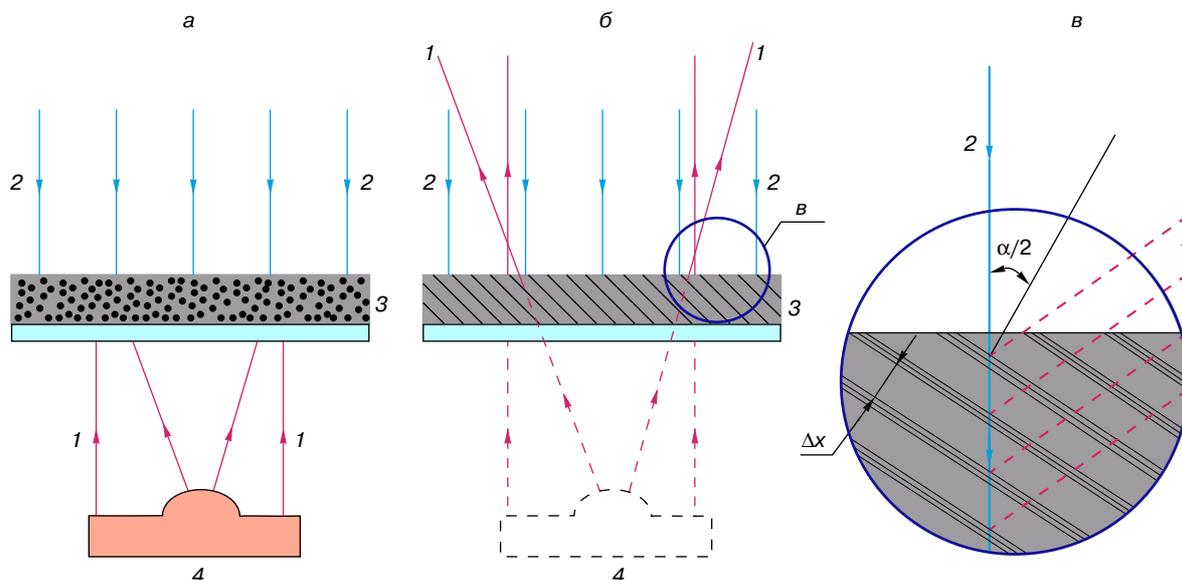
$$\Delta t = \frac{L_1 - L_2}{C}. \quad (8)$$

Здесь  $L_1$ ,  $L_2$  – характерные расстояния, которые нужно пройти предметной и опорной волнам соответственно,  $C$  – скорость света. Для того чтобы интерференционная картина была записана, необходимо, чтобы фаза опорной и предметных волн не изменялась за время  $\Delta t$ . Изменение фазы  $\varphi_0$  со временем приведет к смещению интерференционной картины и однородной засветке фотопластинки. Таким образом, мы приходим к формулировке понятия когерентности – свойства излучения (источника излучения) сохранять фазу со временем. Время, в течение которого фаза излучаемого источником света излучения не изменяется, называется временем когерентности  $\tau_c$ . Поэтому для записи голограммы необходимо, чтобы  $\Delta t$  было меньше, чем время когерентности  $\tau_c$ . Обычные источники света в лучшем случае могут обеспечить  $\tau_c \approx 10^{-9}$  с, что соответствует величине  $L_1 - L_2 \approx 3$  мм. Это совершенно недостаточно для голографирования макрообъектов. Поэтому голография получила распространение только после открытия эффекта квантового усиления света и создания источников когерентного излучения – лазеров.

Рассмотренные голограммы называют голограммами Габора или плоскими голограммами. Они характеризуются тем, что толщина фоточувствительного слоя значительно меньше длины волны.

Другой тип голограмм, разработанный российским ученым Ю.Н. Денисюком, предполагает использование толстых, объемных фотоматериалов, в которых толщина фоточувствительного слоя значительно превышает длину волны. Общая схема записи таких голограмм изображена на рис. 3.

Здесь излучение лазера 2 проходит через толстый светочувствительный слой (рис. 3, а) и рассеи-



**Рис. 3.** Схема записи (а) и воспроизведения (б) голограмм Денисюка, в – схема интерференции отраженных волн: 1, 2 – предметная и опорная волны, 3 – фоточувствительный слой, 4 – предмет

вается предметом 4. Интерференция в объеме фоточувствительного материала рассеянных предметом 1 и падающих 2 волн создает сложную объемную интерференционную картину. Так же как и в предыдущем случае, рассмотрим излучение, отраженное от отдельной точки предмета на достаточно большом удалении, как МПЭВ (рис. 3, б).

В результате интерференции предметной и падающей опорной волн образуется картина, в которой поверхности равной интенсивности представляют собой плоскости, равноотстоящие друг от друга на расстоянии (см. рис. 3, б)

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha/2)}. \quad (9)$$

Здесь  $\lambda$  – длина волны излучения,  $\alpha$  – угол между направлением распространения опорной и предметной волн.

После экспозиции и проявления фотоматериалов на месте максимумов интерференции образуется система полупрозрачных зеркальных плоскостей. Если поместить теперь обработанную пластинку на пути опорного пучка в то же положение, в котором она была при съемке, то восстановится пучок света, соответствующий предметной волне. Почему это происходит?

При частичном отражении падающего опорного пучка от системы полупрозрачных зеркальных плоскостей разность хода отраженных от соседних плоскостей волн (в том направлении, в котором распространялась предметная волна) будет равна длине волны. В результате интерференции всех отражен-

ных волн они будут усиливать друг друга (рис. 3, в). Легко убедиться, что это условие выполняется только при том же угле падения  $\alpha$  и при той же длине  $\lambda$  опорной волны, которые использовались и при записи. Такое свойство голограмм Денисюка дает новое качество. Действительно, если использовать при считывании немонахроматический белый свет, то восстановится только компонента с длиной волны, равной длине волны лазерного излучения, использованного при записи голограммы. Таким образом, голограммы Денисюка записываются с помощью когерентного лазерного излучения, а считывать их можно в обычном белом свете. При этом цвет восстановленного изображения предмета будет таким же, как и цвет лазерного излучения, использованного при записи. Последнее позволяет записывать цветные изображения используя лазеры, излучающие в красной, синей и зеленой областях спектра. Рассматривая такую голограмму в белом свете, мы получим изображение предмета в этих же цветах. Сложение их, так же как и в цветном телевидении, передает цветовые оттенки предмета.

Итак, мы рассмотрели два типа голограмм: плоские (Габо́ра) и объемные (Денисюка). Запись и чтение плоских голограмм возможны только с использованием когерентного, лазерного излучения. Для записи объемных голограмм необходимо когерентное излучение, однако рассматривать их можно и при обычном освещении.

Изготовление голограмм, как плоских, так и объемных, представляет собой технически достаточно сложную задачу. Поэтому голограммы дороги.

Изложение этой части было бы неполным, если бы мы не упоминали о радужных голограммах, стоимость которых невысока благодаря тому, что их можно достаточно просто копировать и, что важно, рассматривать в белом, некогерентном свете. Такие голограммы широко используются в рекламных и дизайнерских целях.

Теория этих голограмм сложна и требует многих пояснений, однако основная идея, положенная в основу радужной голографии, достаточно проста. Смысл ее заключается в том, что при записи голограммы одновременно с изображением предмета записываются и элементы спектрального прибора, выделяющего при наблюдении в белом свете излучение с определенной длиной волны. Часть информации при этом, конечно, теряется, однако полученная голограмма сохраняет свойства объемности предмета. Если снимать такую голограмму не на обычной фотопластинке, а использовать технологии, принятые в микроэлектронике, то можно получить рельефные изображения голограммы на металлической пластинке. В дальнейшем эту пластинку можно использовать для получения оттисков на покрытой металлом полимерной пленке. Такие голограммы используются как элемент защиты от подделок при производстве почтовых марок, денег и других ценных бумаг. Кроме того, эти голограммы очень эстетичны, обращают на себя внимание яркостью и игрой цвета.

Названные три типа голограмм: плоские, объемные и радужные — можно объединить общим названием “оптические статические голограммы”. Эти голограммы фиксируют объемное изображение предмета в электромагнитном поле в видимой, как правило, области спектра с использованием опорного пучка, при записи на фоточувствительном материале (фотопленка, фоторезист) с образованием статического (не меняющегося по времени) изображения.

Прежде чем перейти к описанию других видов голографии, остановимся на некоторых приложениях голограмм статических.

#### **ПРИЛОЖЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ**

Мы немного коснулись области применения голографии, в частности оговорили некоторые применения радужных голограмм. В рамках короткой статьи вряд ли возможно даже упомянуть о всех возможных применениях этого способа записи информации. Однако некоторые наиболее, на наш взгляд, значительные достижения голографии в практической деятельности здесь уместно рассматривать, естественно не претендуя на их полноту. Прежде всего это голографическая интерферометрия, позволяющая зримо наблюдать малые деформации изделий при изменении нагрузки и распределение этих деформаций по поверхности тела.

Очень интересные возможности открываются при использовании голографии в информационных технологиях. Интересны в этом смысле голографические устройства распознавания образов.

Объемные голограммы или голограммы Денисюка широко используются в музейных выставках экспонатов, представляющих историческую или культурную ценность, хищение или порча которых могли бы стать невосполнимой утратой. Такие голограммы реально передают не только объем экспоната, но и его цвет, создавая полную зрительную иллюзию оригинала. Как уже отмечалось, эти голограммы можно рассматривать в некогерентном свете и дополнительного лазерного освещения музейных экспозиций не требуется.

Интересны приложения голографии в системах адаптивной оптики. Под адаптивной оптикой понимается достаточно широкий класс устройств и методов, позволяющих управлять формой волнового фронта оптических полей. Использование голографии позволяет корректировать волновой фронт излучения лазеров. Для этого нужно снять голограмму, в которой в качестве опорного пучка используется излучение лазера с исправленными пространственными характеристиками, а в качестве предметного — излучение лазера, которое нужно откорректировать. Облучая такую голограмму излучением лазера с пространственными искажениями, мы восстанавливаем пучок, обладающий хорошими пространственными характеристиками.

Специально изготовленные голограммы можно использовать в качестве других оптических элементов. Они могут заменять линзы, дифракционные решетки, служить светофильтрами, пропускающими свет с определенными длинами волн. Они позволяют улучшить характеристики микроскопов и телескопов, применяются в системах хранения и обработки информации, открывая перспективы создания новых систем памяти для ЭВМ.

И последнее, на чем хотелось бы остановиться, заключается в проникновении идей голографии в другие области науки.

#### **АКУСТИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ**

Первые попытки совмещения оптических и акустических методов предпринимались давно с целью визуализации интерференционной картины звуковых волн на поверхности жидкости, отраженных от предметов, находящихся в ее объеме.

Использование идей голографии в акустике оказалось очень плодотворным. Очевидно, что получить голограмму акустических волн на фотоматериале трудно. Однако частота акустических волн по сравнению с оптическими невысока, что позволяет измерять не только амплитуду волны (интенсивность), но и фазу. Вспомним, что в оптической голографии информация о фазе рассеянной предметом волны фиксировалась по интерференционной

картине. Фазу рассеянной волны определяли сравнением ее с известной фазой опорного пучка.

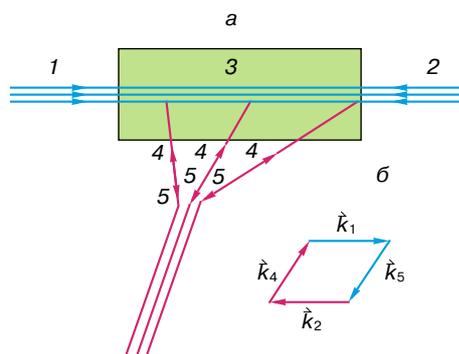
Поскольку фаза акустической волны измеряется непосредственно, то необходимость в опорной волне отпадает, а процесс записи и восстановления голограммы превращается в вычислительный процесс, который может быть выполнен ЭВМ, если пространственное распределение амплитуд и фаз рассеянных предметов волн известно. Благодаря этому акустическая голография получила широкое распространение. С ее помощью можно получать информацию о структуре земной коры, океаническом дне, выявлять наличие неоднородностей в естественных и созданных человеком объектах. Звуковая голография используется в подводном звуковидении, бесконтактной диагностике машин и механизмов, для получения акустических изображений биологических, непрозрачных для света объектов, в устройствах медицинской диагностики для получения информации о внутренних органах и т. д.

### ДИНАМИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Появление лазеров, когерентных источников оптического излучения, дало не только удобный и надежный инструмент для записи и восстановления объемного изображения предметов, но и расширило возможности самой голографии. Помимо когерентности лазерное излучение обладает еще некоторыми особенностями по сравнению с излучением обычных источников света. Интенсивность лазерного излучения может быть очень высокой, так что напряженность поля в электромагнитной волне иногда бывает сравнима с напряженностью поля в атомах вещества, через которое свет распространяется. При таких значениях электрического поля показатель преломления среды начинает зависеть от величины поля. Область оптики, предметом которой являются эффекты, связанные с изменением характеристик среды под действием лазерного излучения, называют нелинейной оптикой. Для нас эти явления интересны тем, что при интерференции опорной и предметной волн интенсивность света меняется в пространстве. В соответствии с ней меняется и показатель преломления, а в среде возникает голограмма объекта, которая существует, пока существуют лазерные поля.

Такая голография называется динамической, поскольку она фиксирует в реальном масштабе времени все изменения в положении и форме предмета в объеме нелинейно-оптической среды. Динамическая голография имеет преимущества перед статической. Мы кратко коснемся лишь наиболее интересных приложений динамической голографии.

На основе динамических голографических преобразователей могут быть созданы логические элементы ЭВМ с чрезвычайно высоким быстродействием ( $10^{-12}$  с), системы оперативной памяти и другие устройства оптоэлектроники.



**Рис. 4.** Схема обращения волнового фронта (а) и закон сохранения импульса (б): 1, 2 – волны накладки, 4 – искаженная волна, 5 – сопряженная волна, 3 – нелинейная среда

Как уже отмечалось, динамическая голограмма меняется в соответствии с изменением в пространстве и времени предметной волны и может быть восстановлена. Чрезвычайно интересна схема считывания, осуществляемая пучком, который, так же как и опорный, является МПЭВ, но распространяется строго в обратном направлении. В этом случае восстанавливается волна, которая отличается от предметной тем, что она распространяется ей навстречу и полностью повторяет форму ее волнового фронта при обратном распространении вдоль ее траектории. Это так называемая сопряженная, или обращенная, волна. Описанный процесс считывания называется обращением волнового фронта (ОВФ). Он был впервые предсказан и обнаружен российскими учеными.

Рассмотрим этот эффект подробнее, обратившись к рис. 4, а. Плоские монохроматические волны 1 и 2 строго навстречу друг другу входят в нелинейную среду 3. На эту же среду падает волна 4, волновой фронт которой искажается после прохождения через среду с переменным по пространству значением показателя преломления. Волны 2 и 4 в объеме среды записывают динамическую голограмму, в которой искажения волны 4 включены автоматически. Волна 2 считывает эту голограмму, и в соответствии с законом сохранения импульса, который выполняется для такого рода взаимодействия достаточно строго (рис. 4, б),

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \vec{k}_4 + \vec{k}_5 = 0, \quad (10)$$

рождается волна 5, направленная строго в обратную сторону по отношению к волне 4. В волновых процессах аналогом импульса выступает волновой вектор  $\vec{k}$ , который задает направление распространения световой волны. Поэтому каждая пространственная компонента со своим волновым вектором  $\vec{k}_4$  восстанавливается в виде обратной волны с  $\vec{k}_5$ . Фактически мы получили зеркало, которое в каждой точке фронта волны 4 имеет поверхность, параллельную

этому волновому фронту, и отражает свет строго назад. Для плоской волны это обычное плоское зеркало. Для волны со случайными искажениями по фронту это должно быть зеркало достаточно сложной формы, да к тому же форма должна меняться со временем в соответствии с изменением во времени среды 5. Необходимо отметить, что считывающая волна 1 может значительно превышать по интенсивности волну 4. Кроме того, это зеркало меняет еще и знак фазы на противоположный. Странное и уникальное получилось зеркало.

Эффект ОВФ позволяет построить устройства, в которых искажения волнового фронта, связанные с неоднородностью среды, могут быть устранены. Последнее чрезвычайно важно при создании мощных лазерных систем, в которых однородность оптических элементов меняется со временем.

Эффект ОВФ просто решает задачу автоматического наведения лазерного излучения на движущуюся мишень, например в установках лазерного термоядерного синтеза, позволяет устранить искажения лазерного пучка, связанные с нестационарными неоднородностями в атмосфере, и незаменим в других приложениях. Он может с успехом применяться и для исследования процессов, протекающих в самой нелинейной среде, что позволяет получать уникальную информацию, недоступную другим методам; в том случае, если либо все, либо одно из полей 1, 2, 4 импульсное, то можно, задерживая импульс во времени, исследовать временную динамику развития нелинейности в среде (см. (7)).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены основные принципы голографии и приведены примеры использования голографии, демонстрирующие лишь малую и не всегда самую значительную часть практического приме-

нения этой новой области волновой оптики. Однако значимость голографии не ограничивается областью ее практического приложения. Важнейшее значение голографии заключается в возникновении и развитии идей принципиально новых, в изучении явлений, которые в природе, как правило, не встречаются. Голография – это мир, от начала и до конца созданный человеческим разумом и яркое подтверждение его неограниченных возможностей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1990. Т. 1.
2. Фролов В.С. Волшебное зеркало. М.: Знание, 1979.
3. Тимофеев Ю.П., Фридман С.А., Фок Н.В. Преобразование света. М.: Наука, 1985. 173 с.
4. Тарасов Л.В. Знакомьтесь – лазеры. М.: Радио и связь, 1988. 192 с. (Науч.-попул. б-ка школьника).
5. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. Нелинейная оптика: адаптивные лазерные системы. М.: Наука, 1980. 130 с.
6. Тарасов Л.В. Лазеры: Действительность и надежды. М.: Наука, 1985. (Б-чка “Квант”; Вып. 42).
7. Карпов С.В., Попов А.К., Слабко В.В., Шевнина Г.Б. Динамика фотохромных реакций фрактальных кластеров серебра // Коллоид. журн. 1965. Т. 57, № 2.

\* \* \*

Виталий Васильевич Слабко, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой высокоэнергетических процессов обработки материалов, проректор по научной работе Красноярского государственного технического университета, ведущий научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН. Область научных интересов – лазерная физика и нелинейная оптика атомных, молекулярных и кластерных сред. Автор более 120 публикаций.