

**ГОЛОГРАФИЯ: ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ**  
**(интервью с членом-корреспондентом АН СССР Ю. Н. Денисюком)**

**Вопрос:** Юрий Николаевич, как начинался Ваш путь в науку?

**Ответ:** В 1954 г. я окончил инженерно-физический факультет Ленинградского института точной механики и оптики (ЛИТМО), Лекции по физической оптике нам читал Б. И. Степанов. Тема всей дипломной работы была «Особенности искрового разряда». Но затем мое внимание привлекли опыты Аббе по дифракционной картине изображения в микроскопе (конец XIX в.) и пластинки Френеля. У меня возникла идея: как получить, используя явления дифракции, наиболее полную информацию об объекте и как эту информацию зарегистрировать?

**Вопрос:** Какое определение можно дать голографии?

**Ответ:** Голографию можно определить как фотографический метод записи, обработки и воспроизведения волновых полей. Применяя этот метод, можно, например, записать волновое поле света, который, распространяясь от объекта, прошел сквозь матовое стекло; затем, обработав запись специальным образом, получим достаточно четкое изображение объекта. В этом случае используются все стороны голограммного метода. Вообще же голография известна с более специфической точки зрения — как метод, с помощью которого получают изображения, создающие полную иллюзию присутствия предмета. Принцип, с помощью которого голограмма создает такую иллюзию, весьма прост, во всяком случае значительно проще, чем в обычной фотографии. В самом деле, мы регистрируем окружающие нас предметы, анализируя волновое поле света отраженного ими излучения. Никакого другого критерия для визуального опознавания у нас нет. Поэтому очевидно, что если бы удалось воспроизвести со всеми подробностями поле света, рассеянного каким-то предметом, то глаз не смог бы отличить такое восстановленное поле от первоначального и увидел бы изображение этого предмета, ничем не отличающееся от оригинала. В частности, это изображение было бы таким же объемным, каким кажется нам реальный объект. Смещая глаз, можно было бы заглянуть за изображаемый предмет, и рассмотреть, что за ним находится. Блики на блестящих деталях такого изображения должны быть столь же живыми и яркими, как и на настоящем объекте, и перемещаться по предмету при перемещении точки наблюдения.

**Вопрос:** Каковы, по Вашему мнению, естественнонаучные предпосылки возникновения голографического метода получения изображения?

**Ответ:** Возможность и отчасти даже способ получения голографических изображений были установлены фактически еще около 300 лет назад Х. Гюйгенсом, который высказал гипотезу о волновой природе света и предложил свой знаменитый принцип. Применительно к голографии из этого принципа, в частности, следует, что для воспроизведения пространственного волнового поля достаточно воспроизвести его значения на какой-то поверхности. Сведение проблемы к воспроизведению поверхностных волновых полей существенно упростило задачу, однако даже для осуществления этой гораздо более простой операции потребовалось свыше 200 лет... Первый наиболее существенный шаг в данном направлении был сделан Т. Юнгом, открывшим явление интерференции излучения (1840 г.). Таковы фундаментальные явления, лежащие в основе голограммного метода. Дальнейшая история развития этого метода связана с именами многих ученых.

**Вопрос:** Среди этих ученых видное место, вероятно, принадлежит Д. Габору?

**Ответ:** Безусловно! И интерес в данном случае представляет не только существо метода Габор, но и история его появления, которая служит еще и характерным примером основ практических приложений голографии. В 1948 г., работая над усовершенствованием электронного микроскопа, Габор столкнулся с необходимостью улучшить качество изображения, которое сильно искажалось так называемой сферической аберрацией электронных линз. На первый взгляд эта проблема не кажется значительной, так как в световой оптике она решается достаточно просто. Однако в электронной оптике действуют иные законы, и оказалось, что там сферическую аберрацию исправить невозможно. Чтобы обойти эту трудность, Габор предложил построить точную модель поля электронных волн в световом диапазоне, а затем исправить у нее сферическую аберрацию средствами обычной световой оптики. Именно к решению данной задачи и была применена голография.



Юрий Николаевич Денисюк

**Вопрос:** Как же это было осуществлено у Габор?

**Ответ:** Ход мысли Габор был весьма прост (рисует схему). На объект  $O$  падает излучение от источника  $S$ . За объектом располагается фотопластинка  $F$ , регистрирующая результат сложения излучения, рассеянного объектом, и излучения, которое попадает на фотопластинку, минуя объект, предположим, что фотопластинка зафиксировала поле стоячих волн так, что ее коэффициент пропускания в каждой точке пропорционален интенсивности светового поля. Направим на полученную таким образом голограмму излучение монохроматического источника  $S$ . Поскольку коэффициент пропускания голограммы пропорционален интенсивности стоячей волны, то голограмма промодулирует волну от источника так, что амплитуда ее в плоскости, непосредственно прилегающей к фотопластинке, будет совпадать с амплитудой стоячей волны. Если бы при этом совпадали и фазы, то в соответствии с принципом Гюйенса во всем пространстве за голограммой восстановилась бы первоначальная стоячая волна. Наблюдатель зарегистрировал бы при этом компоненты, составляющие такую волну, и увидел бы референтный источник и объект  $O'$ . Однако фаза на поверхности такой голограммы совпадает не с фазой первоначальной волны, а с фазой излучения источника  $S$ . Этим обусловлено появление второго, действительного изображения объекта  $O''$ , расположенного симметрично мнимому по другую сторону пластинки  $F'$ . В данном случае действительное изображение можно рассматривать как ошибку процесса. Полученные Габором изображения объектов были сильно искажены из-за взаимного наложения этих двух изображений: действительного и мнимого. Кроме того, с помощью этого метода можно было регистрировать только сугубо специальные объекты, такие, как, например, диапозитивы печатных текстов.

**Вопрос:** Было ли Вам известно в конце 50-х годов об опытах Д. Габор по голографии? Были ли Вами повторены эти опыты, или Вы пришли к идее записи волнового поля за счет его смещения с референтной волной совершенно самостоятельно?

**Ответ:** О публикациях и работах Габор я ничего не знал и пришел к этой идее самостоятельным путем. Мой метод существенно отличался от метода Габор. Вообще открытие мое было счастливой случайностью... Такое бывает очень редко...

В тот период наши исследования базировались скорее на работах французского физика Габриэля Липпмана, в одной из которых и был предложен метод получения фотографий, воспроизводящих пространственные изображения объектов с помощью специальной растровой системы, составленной из множества мелких линз (так называемая интегральная фотография Липпмана). Проведенный нами анализ, однако, показал, что этот метод противоречив в самой своей основе: при попытке увеличить число элементов растра разрешающая способность каждого элемента стремится к нулю.

Было очевидным, что для решения поставленной задачи необходимо найти иной способ записи и восстановления волновых полей.

**Вопрос:** В чем, как Вы считаете, состояла новизна Вашего подхода?

**Ответ:** В 1958—1962 гг. мной были проведены исследования, основным результатом которых было обнаружение так называемого «явления отображения оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения». Сущность этого явления заключалась в том, что трехмерная фотографическая модель картины стоячих волн, возникающих при рассеянии излучения на произвольном объекте, представляла собой своего рода оптический эквивалент этого объекта. Если теперь на такую «волновую фотографию» направить излучение источника с белым спектром, то она отразит это излучение так, что возникнет единственное цветное неискаженное пространственное изображение объекта, картина стоячих волн которого была зарегистрирована фотографией.

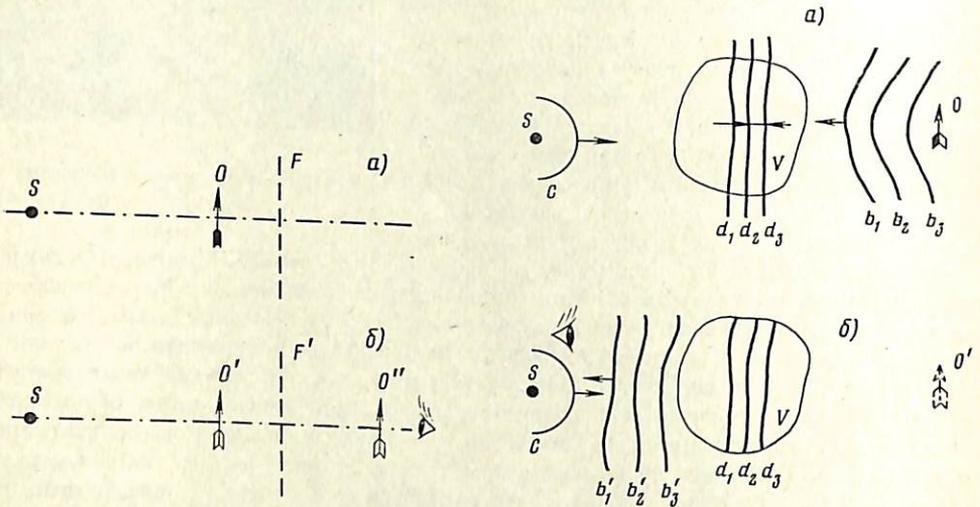


Схема получения (а) и восстановления (б) голограмм по методу Д. Габора. Рис. Ю. Н. Денисюка

Схема получения (а) и восстановления (б) трехмерных голограмм. Рис. Ю. Н. Денисюка

Схематически это можно представить себе так (рисует схему). Здесь фотопластинка  $V$  устанавливается перед объектом со стороны источника  $S$ . После экспозиции и проявления в эмульсионном слое фотопластинки образуется трехмерная слоистая структура ( $d_1, d_2, d_3$ ), моделирующая пространственное распределение интенсивности в стоячей волне, образованной в результате наложения рассеянного объектом  $O$  излучения и излучения источника  $S$ . Такая структура, подобно интерференционному фильтру, обладает спектральной селективностью и поэтому допускает реконструкцию с помощью обычного источника со сплошным спектром, например лампы накаливания. Механизм действия такой голограммы в общих чертах заключается в следующем. Поверхность пучностей данной стоячей волны есть геометрическое место точек, в которых фаза излучения источника совпадает с фазой излучения, рассеянного объектом. Очевидно, что если на зарегистрированную голограммой поверхность пучностей направить излучение источника, то фаза отраженной волны совпадает с фазой излучения, рассеянного объектом. Амплитуда в этом случае также восстанавливается, поскольку коэффициент отражения рассматриваемого слоя пропорционален амплитуде излучения, рассеянного объектом. Каждую зарегистрированную трехмерной голограммой поверхность стоячей волны можно представить как зеркало сложной формы, которое преобразует сферическую волну от источника в волну, полностью идентичную волне излучения, рассеянного объектом.

Таким образом, трехмерные голограммы, записанные по моему методу, допуская реконструкцию белым светом, воспроизводят при этом все наиболее существенные характеристики волнового поля: амплитуду, фазу и спектральный состав. Ложное изображение при этом отсутствует.

В 1962 г. мне удалось обнаружить, что сама двухмерная голограмма в действительности представляет собой лишь только частный случай гораздо более общего яв-

ления. Оказалось, что более полный комплекс отображающих свойств заключен в объемной картине интерференции — так называемой стоячей волне. Трехмерная материальная модель такой волны однозначно воспроизводит амплитуду, фазу и спектральный состав записанного на ней излучения. В дальнейшем было показано, что отображающими свойствами обладают не только стоячие, но и бегущие волны интенсивности, которые образуются в том случае, когда частоты объектной и референтной волн различны.

**Вопрос:** Как было встречено Ваше открытие научной общественностью? Сразу ли оно получило признание и поддержку, или спустя некоторое время?

**Ответ:** Моя идея записи голограмм в трехмерной среде была встречена резко отрицательно и никакой поддержки поначалу не получила. Ряд ученых-оптиков были настроены очень консервативно (например, покойный Тудоровский). Поддержали меня академики В. П. Линник, И. В. Обренмов и П. Л. Капица... П. Л. Капица искренне заинтересовался моим открытием, но его молодые ученики меня не поддержали... Тем не менее в Докладах АН СССР вскоре (1962 г.) появилась моя статья о записи голограммы в трехмерной среде. Она была представлена академиком В. П. Линником. Однако особого внимания к ней поначалу также не возникло...

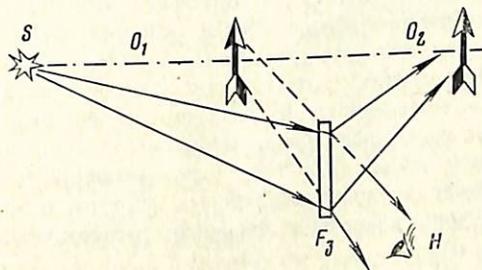


Схема реконструкции голограмм в эксперименте Э. Лейта и Ю. Упатниекса. Рис. Ю. Н. Денисюка. S — монохроматический источник излучения,  $F_3$  — голограмма,  $O_1$  — мнимое изображение объекта,  $O_2$  — действительное изображение объекта, H — глаз наблюдателя

**Вопрос:** Что представляла собой Ваша первая установка для записи голограмм? Сохранилась ли она до наших дней, где ее можно увидеть?

**Ответ:** Первая моя установка для записи голограмм в трехмерной среде сохранилась и находится в Политехническом музее в Москве. В качестве источника света использовалась ртутная лампа.

**Вопрос:** Какие новые результаты были получены Вами с изобретением лазера?

**Ответ:** С изобретением в начале 60-х годов лазера для голографии открылись новые возможности. Было выяснено, как влияет когерентность света на изображение. Стало возможным получать фотографии «импульса света в полете». Качество самих голограмм резко возросло.

Первыми, кто использовал новые технические возможности и применил лазер для получения голограмм, были американские исследователи Е. Лейт и Ю. Упатниекс (1961 г.). Запись голограмм осуществлялась ими по схеме Габора, однако в нее были внесены существенные изменения, которые позволили значительно улучшить качество реконструированного изображения (рисует схему). Однако отображающие свойства голограмм Лейта и Упатниекса были все же более бедными, чем голограмм с записью в трехмерной среде: ложное изображение в этом случае все равно оставалось, а реконструкцию можно было осуществлять только с помощью излучения лазера.

**Вопрос:** Какие наиболее крупные достижения в области голографии принадлежат советским ученым?

**Ответ:** Прежде всего метод записи голограмм в трехмерной среде; затем открытие В. В. Рагульским и Я. Б. Зельдовичем явления отображения волнового фронта; открытие резонансной голографии, или явления «фотонного эха»; открытие в 1972 г. Ш. Д. Какнишвили поляризационной голографии. На последнем открытии я хочу остановиться более подробно.

В 1972 г. Ш. Д. Какичашвили показал, что в сложном поле интерференции произвольно поляризованных волн зашифрована также и информация о состоянии поляризации интерферирующих компонентов. Для того чтобы выявить эту информацию, достаточно записать голограмму в светочувствительной среде, которая под воздействием поляризованного излучения становится анизотропной. В частности, Какичашвили предложил использовать для этой цели эффект наведения светом анизотропии показателя поглощения — так называемый эффект Вейгера.

Поляризационная голография — далеко не единственный пример того, как во многих случаях именно светочувствительная среда оказывает решающее влияние на весь комплекс свойств голограммы. В последнее время начал развиваться ряд новых важных направлений, таких, как динамическая голография, голография в резонансных средах, а также эффект обращения волнового фронта при вынужденном рассеянии света. Каждое из этих направлений обязано своим появлением определенной особенности характера отклика того или иного класса светочувствительных сред на излучение. При всем этом следует помнить, однако, что какую бы важную роль ни играл фотоматериал, в основе отображающих свойств голограммы все же лежат отображающие свойства волновых полей.

**Вопрос:** Какие проблемы стоят перед голографией сегодня?

**Ответ:** В настоящее время фронт наиболее активных исследований переместился в так называемую динамическую голографию. Под этим термином обычно понимают случай, когда трехмерная картина стоячих волн записывается в среде, которая реагирует на излучение непосредственно в процессе его воздействия. По характеру закономерностей динамическая голография представляет собой синтез голографии в трехмерных средах и нелинейной оптики. При этом закономерности голографии используются для описаний трансформаций сложных волновых фронтов, а закономерности нелинейной оптики — для описания характера поведения регистрирующей среды в процессе воздействия на нее излучения.

Наиболее характерной областью исследований динамической голографии являются преобразования волновых фронтов, выполняемые непосредственно в момент их существования. Однако эффекты динамической голографии проявляются также и в процессе записи обычных статических объемных голограмм, когда такие голограммы регистрируются на фотоматериалах, которые не образуют скрытого изображения, нуждающегося в проявлении, а реагируют на свет непосредственно в процессе экспозиции. Собственно говоря, с исследования именно этих эффектов, свойственных записи на щелочно-галогидных кристаллах, ниобате лития, а также реоксана, и было начато исследование закономерностей динамических голограмм.

В последнее время появилась новая, крайне интересная область динамической голографии, соответствующая случаю, когда голограмма записывается в резонансной среде, т. е. такой, у которой линия поглощения — испускания на нижний уровень совпадает с длиной волны экспонирующего голограмму излучения.

Фактически резонансная голография появилась в результате развития идей светового эха. Как известно, этот эффект сводится к тому, что если на резонансную среду послать последовательно два импульса света, разделенных интервалом времени  $t_0$ , то через следующий точно такой же интервал времени  $t_0$  после второго импульса появится эхо — среда испустит добавочный третий импульс.

Появление эха можно интерпретировать как способность среды запоминать и воспроизводить временные параметры электромагнитного поля — в данном случае интервал времени между последовательными импульсами. Именно этой стороной эффекта и интересовались его первооткрыватели, хотя ими было отмечено, что среда «помнит» также и пространственное распределение фаз первого импульса.

Голография с записью в резонансных средах, в которой пространственная память голограммы органически объединяется с временной памятью фотонного эха, открывает принципиально новую возможность запоминать и затем точно воспроизводить динамические процессы, связанные с изменением состояний во времени и пространстве. В дальнейшем это явление станет, по-видимому, основой для создания нового сверхскоростного инструмента регистрации физических процессов и воздействия на них.

У голографии в резонансных средах есть еще один крайне интересный аспект развития. Исследование процесса, позволяющего объективно регистрировать и воспроиз-

водить пространственно-временную последовательность событий окружающего мира и даже полностью инвертировать эти события в пространстве и времени, несомненно, должно пролить какой-то новый свет на одно из самых фундаментальных и загадочных явлений природы — время и его связь с событиями.

**Вопрос:** А каковы перспективы использования голографии в кино и телевидении?

**Ответ:** Если большинство из рассмотренных возможностей голографии представляют интерес только для специалистов, то перспективы создания голографического объемного кинематографа и телевидения живо интересуют самые широкие слои населения. Причина популярности этой идеи достаточно понятна: стоит только взглянуть на обычную статическую изобразительную голограмму, чтобы представить себе возможности, которые приобретает кинематограф, если такие изображения появятся на экране.

Голография действительно способна создать изображения, в принципе неотличимые от оригинала, и окружить, таким образом, человека призрачным миром, создающим полную иллюзию действительности изображаемой сцены. Однако при этом возникает ряд серьезных эстетических, моральных, медицинских и научно-технических проблем.

Научно-технические проблемы поставлены в этом перечне на последнее место совсем не случайно. Хотя они и очень сложны, но в общем ясно, что эти проблемы могут быть решены в достаточно обозримые сроки. Основной вопрос заключается в том, не окажется ли такое зрелище вредным для здоровья и психики человека. Ведь зритель такого кино одновременно с иллюзией присутствия получит ряд противоречивых ощущений; например, зрение будет уверять зрителя в том, что он стоит на палубе качающегося корабля, а вестибулярный аппарат будет настаивать на том, чтобы зритель удобно расположился в неподвижном кресле.

Эти, а также множество других аналогичных проблем будут решены с созданием экспериментальной системы объемного голографического кинематографа, которая разрабатывается в настоящее время В. Г. Комаром. В соответствии с принятой автором методикой сцена при съемке освещается короткими импульсами излучения трехцветного лазера, следующими синхронно с частотой смены кадров, и регистрируется на движущейся пленке в виде последовательности голограмм. Для того чтобы снизить требования к источникам света, используемым на стадии проекции фильма, изображения сцены фокусируются при этом на поверхность пленки с помощью объектива с большим диаметром входного зрачка. В этом отношении данный метод несколько похож на съемку в случае обычного кинематографа.

Проекция объемного изображения осуществляется следующим образом. Пленка с кадрами-голограммами восстанавливается трехцветным излучением газоразрядной лампы, и восстановленное голограммой объемное изображение проецируется через тот же объектив, а также через специальный экран каждому из зрителей, сидящих в зале. Основная особенность системы проекции связана с устройством экрана. Экран в этом случае не диффузный, а представляет собой громадный голографический оптический элемент, действующий подобно множеству вогнутых зеркал, каждое из которых проецирует изображение объектива проекционного аппарата на одного из зрителей, сидящих в зале. Смотря через изображение проекционного объектива, как через окно, зритель видит объемное изображение сцены.

Экспериментальная система голографического кинематографа разрабатывается и испытывается в настоящее время в нескольких вариантах. В результате этих исследований создан первый голографический кинофильм продолжительностью несколько десятков секунд, который был успешно продемонстрирован в октябре 1976 г. В Москве на VII Международном конгрессе по кинематографии. Нет никакого сомнения в том, что после создания такой системы в полном объеме вопрос о совместимости объемного кино с психикой человека и наиболее целесообразных путях его развития будет в основном решен. Однако уже сейчас очевидно, что объемный кинематограф, основанный на непосредственной регистрации голограмм сцены действия, практически не имеет шансов на широкое применение в качестве массового зрелища: очевидно, что лазерная подсветка неблагоприятно скажется на здоровье артистов и, кроме того, в этом случае полностью исключается возможность съемки натуральных сцен, например, стадиона, ландшафтов и т. д.

Профессиональный кинематограф будет, по-видимому, развиваться по нескольким

инному направлению. Сцена действия будет регистрироваться методами обычной фотографии через линзовый растр — периодическую систему объективов, каждый из которых формирует свое собственное маленькое изображение сцены. Голография будет использоваться, по-видимому, только для того, чтобы записать систему таких изображений в компактном виде на киноплёнку. При этом следует учитывать, что поскольку изображения, созданные различными объективами растра, мало отличаются друг от друга, то и для записи информации, содержащейся в этих изображениях, потребуется не очень большая площадь кадра (или полоса частот в случае телевидения). На основе записанной таким образом информации будут синтезироваться объёмные изображения, проекция которых в зал будет осуществляться с помощью экранов, аналогичных разработанным для системы экспериментального кинематографа.

**Вопрос:** Существуют ли какие-либо другие перспективные направления использования голографии в науке и технике?

**Ответ:** «Центральное» оптическое явление голографии в том виде, в котором оно известно в настоящее время, позволяет записывать и воспроизводить практически все параметры волнового поля при весьма широком диапазоне свойств и параметров объектов. Это явление допускает регистрацию и воспроизведение волновых полей объектов, движущихся со скоростями вплоть до релятивистских; при этом воспроизводятся амплитуда, фаза, спектральный состав и поляризация излучения. Развиваются методы, позволяющие записать изменение параметров излучения во времени. Свойство голограммы формировать обращенные (сопряженные) волны находит важные применения для компенсации влияния оптических неоднородностей сред. Процессы, протекающие в трехмерной голограмме, в некоторых отношениях родственны процессам мышления и могут быть использованы в дальнейшем для их имитации. На основе трехмерной голограммы может быть создана сверхплотная оптическая память. Свойство голограммы копировать объекты применяется в настоящее время для создания различных оптических элементов. В целом голография имеет широкие перспективы в качестве универсального объективного метода записи и отображения явлений окружающего мира.

**Вопрос:** Мой последний вопрос имеет более общий характер: как Вы относитесь к исследованиям по истории науки и техники, в чем Вы видите их значение?

**Ответ:** Я считаю, что история науки и техники — необходимый и очень важный элемент истории вообще и истории культуры человечества в частности. Именно через историю науки и техники устанавливается неразрывная связь времен: от прошлого к будущему через настоящее. Вообще мне кажется, что каждый ученый должен хорошо знать историю того, чем он занимается, это значительно расширяет его кругозор.

Интервью вел В. А. Гуриков.