1973 г. Январь *Том 109, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1971 г.*)

535.41 (042)

ГОЛОГРАФИЯ (1948—1971 гг.)**)

Д. Габор

В отличие от многих моих предшественников, выступавших здесь, я нахожусь в более выгодном положении, поскольку мне не нужно выписывать уравнения или показывать сложные графики. Конечно, при изложении голографии можно воспользоваться почти любым объемом математического аппарата, но сущность голографии может быть объяснена и понята исходя из рассмотрения физических явлений.

В основе голографии лежит волновая природа света. Волновые свойства света были впервые обнаружены и наглядно продемонстрированы Томасом Юнгом в 1801 г. с помощью поразительно простого опыта (рис. 1). Юнг пропустил солнечные лучи в темное помещение и на их пути расположил два экрана: темный с двумя точечными отверстиями и белый (на некотором расстоянии позади первого). По обе стороны от яркой линии на белом экране он увидел две темноватые полоски, что привело к решению повторить опыт. На этот раз он воспользовался спиртовой горелкой и добавил в ее пламя

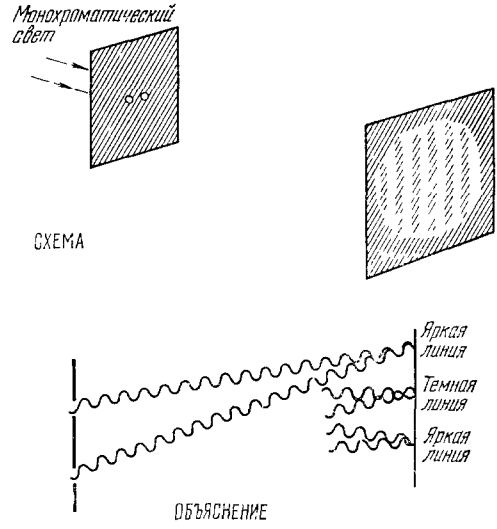


Рис. 1. Эксперимент по интерференции Томаса Юнга (1801 г.).

*) Copyright The Nobel Foundation 1972.

**) Dennis Gabor, Holography, 1948—1971. Nobel Lecture, December 13, 1971. Preprint: Les Pris Nobel en 1971, Stockholm, 1972. Перевод Л. М. Сороко.

Деннис Габор является старшим научным сотрудником Королевского колледжа науки и техники в Лондоне и научным руководителем лаборатории компании «Columbia Broadcasting System», Стэнфорд, Конектикут (США).

Нобелевская лекция Денниса Габора опубликована также: Proc. IEEE 60, 655 (1972) (этот журнал полностью переводится на русский язык изд-вом «Мир», ТИИЭР). (*Прим. ред.*)

небольшое количество поваренной соли для получения яркого желтого излучения натрия в качестве источника света. На экране возникла картина из регулярно расположенных темных полос. Этот эксперимент явился первым убедительным доказательством того, что наложение света может образовать темноту. Данное явление называется интерференцией, и Юнг предвидел его, поскольку в своих рассуждениях исходил из волновой теории света. Томас Юнг интуитивно полагал, что монохроматический свет представляет собой регулярные синусоидальные колебания среды (которую в то время называли «эфиром»), и тем самым внес существенный вклад в исходную идею Христиана Гюйгенса. А если это предположение соответствует действительности, то повышение яркости света должно возникать при сложении гребня одной волны с гребнем другой и ослабление яркости до темноты — при сложении гребня со впадиной.

Свет, способный интерферировать, называется «когерентным». Вполне очевидно, что для образования большого числа интерференционных полос свет должен быть *весьма* монохроматичным. Когерентность удобно выражать через максимальную разность хода двух лучей света от одного и того же источника, при которой еще видна контрастная интерференционная картина. Эта величина, называемая длиной когерентности, имеет важное значение как в теории голографии, так и на практике. Лорд Рэлей и Альберт Майкельсон впервые выявили, что длина когерентности является величиной, обратной ширине спектральной линии. Майкельсон мастерски использовал эту связь в своем оригинальном методе спектрального анализа *) и при измерении диаметров звезд.

Теперь давайте перенесемся мысленно на полтора столетия вперед, к 1947 г. В то время я очень интересовался электронным микроскопом. Это был удивительный прибор, который давал разрешение в сто раз лучше, чем оптический микроскоп, и тем не менее не оправдывал надежд на разрешение атомов кристаллической решетки. Длина волны де Бройля быстрых электронов (около 1/20 Å) была для этого достаточной, но электронная оптика оказалась довольно несовершенной. Наилучшая электронная линза, которая могла быть изготовлена, по оптическим характеристикам была сравнима с дождевой каплей, а не с объективом оптического микроскопа и, как показал Шерцер в своей теоретической работе, никогда не могла быть усовершенствована. Теоретический предел разрешающей способности электронного микроскопа оценивался в то время в 4 Å, что было в два раза хуже величины, требуемой для разрешения атомов кристаллической решетки; на практике же достижимый предел не превышал 12 Å. Эти пределы разрешающей способности электронного микроскопа вытекали из необходимости ограничивать угловую апертуру электронной линзы до нескольких миллирадиан. При такой апертуре сферические аберрации равнялись дифракционному пределу разрешения. Увеличение апертуры вдвое приводило к уменьшению дифракционного предела в два раза, но при этом сферические аберрации возрастали в 8 раз. Регистрируемое в этих условиях изображение получалось безнадежно размытым.

После длительного размышления над этой проблемой я в один из прекрасных весенних дней 1947 г. неожиданно нашел ее решение, сущность которого более или менее раскрывается рис. 2. Почему бы, например, не воспользоваться размытой «электронной» картиной, но такого вида, при котором она содержала бы в себе всю информацию об объекте, и испра-

---

) В настоящее время этот метод называется спектроскопией Фурье (см. [21]). (*Прим. перев.*)

вить ее оптическими средствами? В какой-то момент мне стало ясно, что если это вообще и возможно, то только с помощью когерентного пучка электронов, в котором фазы электронных волн имеют определенное значение. Как известно, в обычной фотографии фаза полностью теряется, а регистрируется только интенсивность. Потеря фазы не вызывает удивления, поскольку в этом случае не существует ничего, с чем можно было бы ее сравнить! Давайте посмотрим, что произойдет, если ввести эталон для фазы, добавить так называемый «когерентный фон». Моя аргументация будет понятна на простейшем примере, представленном на рис. 2 для точечного объекта. Благодаря интерференции предметной волны с когерентным фоном, или «опорной волной», возникнут интерференционные полосы. Всюду, где фазы двух волн оказываются одинаковыми, будут образовываться максимумы, соответствующие повышению яркости. Если изготовить фототранспарант этой картины таким образом, чтобы свет проходил через него в тех местах, где находятся

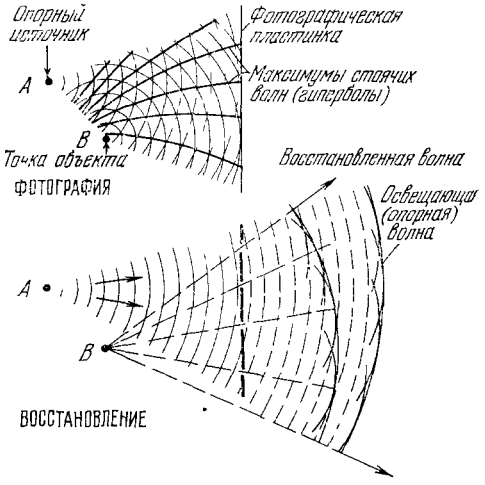


Рис. 2. Основная идея голографии (1947 г.).

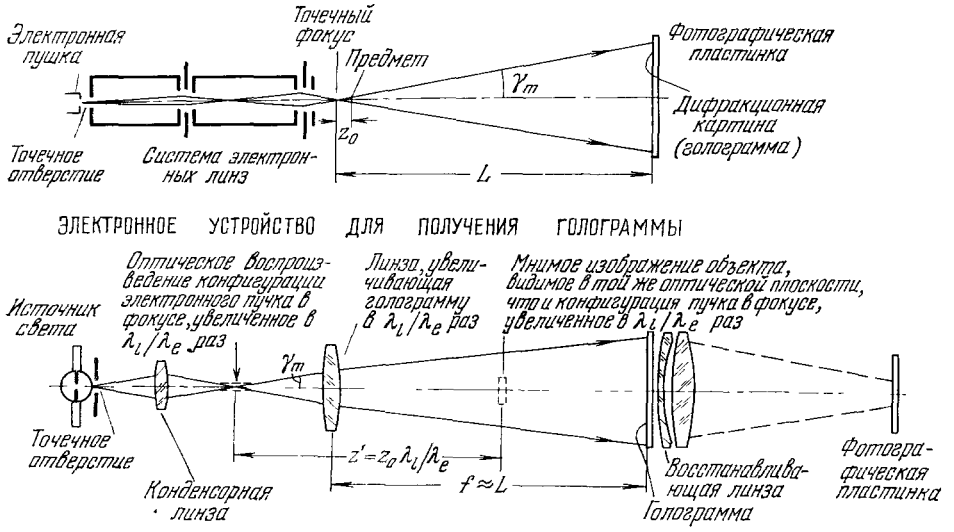


Рис. 3. Принцип работы электронного микроскопа с восстановлением волнового фронта [16].

максимумы интерференционной картины, и затем осветить его только одним опорным пучком, то, безусловно, фазы поля будут соответствовать фазам опорного источника A. Однако, поскольку в прозрачных участках фотопозитива фазы поля источника A и фазы поля от объекта B были одинаковыми, в этих пропускающих участках фазы поля будут

одновременно соответствовать фазам поля от объекта *B*. Это означает, что с неизбежностью появится *восстановленная* волна *B*.

Простейшие математические выкладки вскоре показали, что рассмотренный принцип является правильным и для объекта любой сложности. Позднее обнаружилось, что природа в голографии выступает на стороне изобретателя. Оказалось, что нет необходимости изготавливать фотографический позитив; для целей восстановления годится любой фотонегатив. Придя к такому обнадеживающему выводу, я стал завершать разработку системы, названной мной впоследствии электронным микроскопом с восстановлением фронта волны, и предложил схему двухступенчатого процесса, показанную на рис. 3. Электронный микроскоп использовался для получения картины интерференции между предметным

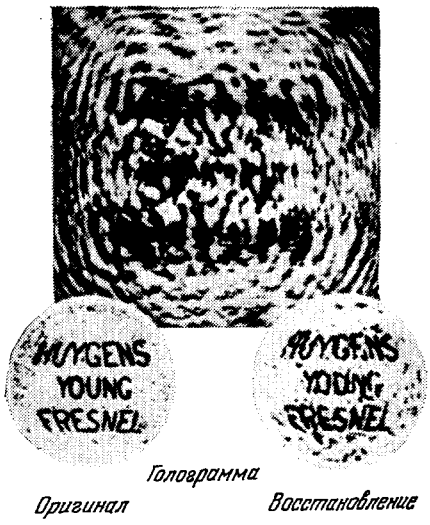


Рис. 4. Первое изображение, восстановленное голографическим методом в 1948 г.

Рис. 5. Еще одно голографическое изображение, полученное в 1948 г. [16].

пучком и когерентным фоном, — так сказать, недифрагированной компонентой освещающего поля. Эту интерференционную картину я назвал «голограммой» (от греческого слова «holos», что означает «полный»), поскольку она содержит полную информацию об объекте. Затем голограмма подвергалась стадии восстановления в лучах видимого света с помощью оптической системы, которая устраняла аберрации электронной оптики [1].

Выдвигая свое предложение, я опирался на работы двух крупнейших физиков — Уильяма Брэгга и Фрица Цернике. Несколькими годами раньше Брэгг показал мне «рентгеновский микроскоп», который представлял собой оптическое устройство, выполняющее преобразование Фурье. Если в такое устройство поместить небольшую фотографию обратной решетки, то на экране можно получить проекцию распределения концентрации электронов, правда, только для некоторых исключительных случаев, когда значения всех фаз действительны и имеют один и тот же знак. В то время ни я, ни Брэгг не знали, что Мечислав Вольфке предложил этот метод еще в 1920 г., но не реализовал его экспериментально [22*].

Поэтому я считаю, что именно Брэгг натолкнул меня на идею о двухступенчатом методе. С другой стороны, когерентный фон весьма успешно использовал Фриц Цернике в своих великолепных исследованиях аберраций линз путем отображения фазы, а не интенсивности. От Брэгга и Цернике ускользнул только принцип восстановления.

В 1947 г. я работал в Научно-исследовательской лаборатории фирмы «British Thomson — Houston Company», Рагби, Великобритания. Оказалось довольно удачным, что идея о голографии пришла ко мне *через* электронную микроскопию. Если бы я думал только об оптической голографии,

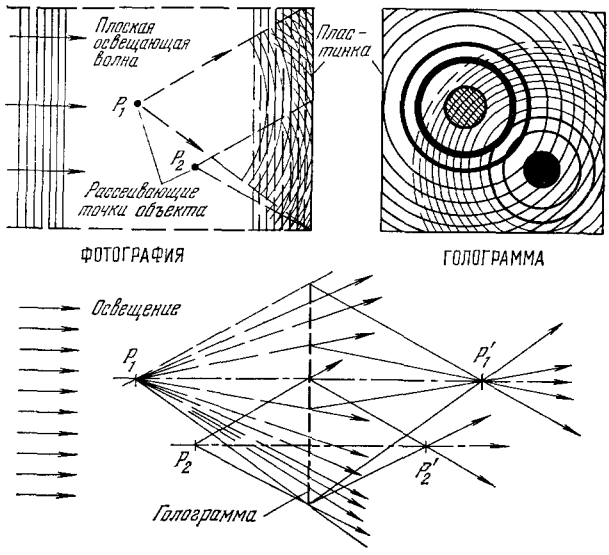


Рис. 6. Схема образования второго изображения.
Голограммы точек объекта образуют линзы Сорэ.

то директор по научным исследованиям Дэйвис был бы вправе возражать против такого направления, мотивируя тем, что фирма «BTH» специализируется в области электротехники, а не оптики. Однако, поскольку наша родственная фирма «Metropolitan Vickers» была изготовителем электронных микроскопов, мне разрешили провести некоторые оптические эксперименты. На рис. 4 показано одно из первых изображений, восстановленных голографическим методом. Эксперименты были далеко не простыми. Наилучшее компромиссное решение для получения когерентного и интенсивного излучения было достигнуто за счет использования ртутной лампы высокого давления; длина когерентности излучения такой лампы составляла лишь 0,1 *мм* и оказалась достаточной для формирования примерно 200 интерференционных полос. Однако, чтобы создать пространственную когерентность, я со своим ассистентом Уильямсом должен был осветить лучами одной ртутной линии точечное отверстие диаметром 3 *мкм*. Интенсивность прошедшего света обеспечила формирование голограмм диаметрами около 1 *см* от объектов, представляющих микрофотографии диаметром около 1 *мм*. Длительность экспонирования наиболее чувствительной в то время фотоэмульсии составляла несколько минут. Малая длина когерентности заставила нас расположить все элементы схемы на общей оси. Теперь такая схема называется голографией с прямым опорным пучком. Тогда же можно было реализовать только эту

схему. Рис. 5 иллюстрирует результаты несколько более качественного эксперимента, наилучшего из нашей серии. Однако и он далек от совершенства. Помимо *свилей*, создаваемых случайно расположенными возмущениями, на картинах проявляется систематический дефект в виде искажений восстановленных букв. Объяснение этому дает рис. 6. Искажения возникают из-за того, что при восстановлении формируется не одно изображение, а *два*. Каждая точка объекта испускает сферическую вторичную волну, которая интерферирует с когерентным фоном, за счет чего образуется система круговых зон Френеля. Такая система носит название линзы Сорэ (по имени оптика, который первый ее изготовил). Она является комбинацией положительной (собирающей) и отрицательной (рассеивающей) линз. Фокус одной из них находится в исходном положении точки объекта, фокус другой — в точке, оптически сопряженной с первым фокусом относительно освещающего волнового фронта. При использовании «голографии с прямым опорным пучком» оба восстановленных изображения располагаются на одной линии, и их разделение может быть осуществлено только путем наведения на фокус. Однако разделение никогда не будет полным, так как в поле когерентного освещения каждая точка создает за собой кильватерное возмущение, которое простирается на большие расстояния.

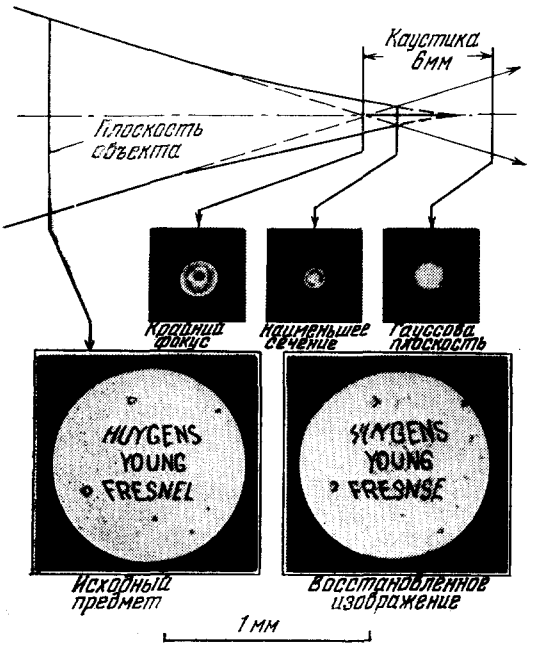


Рис. 7. Схема устранения второго изображения путем компенсации сферических аберраций на стадии восстановления.

Ниже я расскажу, как в современной лазерной голографии высокая когерентность излучения лазера позволяет довольно просто избавиться от этого возмущения. В 1948 г. такое излучение еще не было получено. Тем не менее я не сомневался, что смог бы исключить второе изображение в интересующей меня задаче разрешения атомов на электронном микроскопе. Метод, показанный на рис. 7, дает возможность исключить второе изображение с помощью самого дефекта электронной линзы — ее сферической аберрации. Если сначала сформировать голограмму в пучке электронов при использовании электронной линзы, имеющей сферические аберрации, и затем соответствующей оптической системой исправить только *одно* из двух изображений, то во втором изображении аберрации усилятся вдвое и почти полностью его размоют. На рис. 7 видно, как с помощью линзы, дающей разрешение в 10 раз хуже, чем требуется, было создано идеально четкое восстановленное изображение, в котором почти ничего не осталось от искажений, обусловленных вторым изображением. Такая плохая линза была получена при неправильной установке объектива микроскопа и повторно использована на стадии восстановления.

Эти результаты оказались настолько обнадеживающими, что двумя годами позже, в 1950 г., мы начали разработку голографического электронного микроскопа в научно-исследовательской лаборатории фирмы «Associated Electrical Industries» (Олдермастон) под руководством доктора Эллибона с участием моих друзей и коллег Хэйна, Дайсона и Малвея *). В это время я сотрудничал в Королевском колледже и принимал участие в разработках в качестве консультанта. За три года нам удалось существенно улучшить электронный микроскоп, но в конце концов мы должны были отказаться от этой работы, так как поняли, что начали ее преждевременно. Обнаружилось, что электронный микроскоп был еще очень далек от того предела, который накладывается оптическими аберрациями. Электронный микроскоп «страдал» от механических колебаний, рассеянных магнитных полей, ползучести предметного столика, загрязнений образца, что отрицательно сказывалось при длительных экспозициях, необходимых в случаях слабого когерентного электронного пучка. *Теперь*, 20 лет спустя, пришло время возобновить эту программу, поскольку все упомянутые дефекты постепенно были устранены терпеливой работой специалистов в области электронной микроскопии. Разрешение электронного микроскопа подошло к пределу, даваемому сферическими аберрациями, т. е. примерно к 3,5 Å, и для наблюдения атомной решетки осталось улучшить разрешение всего в 2 раза. Кроме того, отпала необходимость в очень длительных экспозициях, какие мы должны были производить в 1951 г., поскольку благодаря разработке полевого эмиссионного катода интенсивность когерентного тока возросла на 3—4 порядка величины. Итак, по-видимому, для меня имеет смысл жить, чтобы увидеть реализацию моего старого замысла.

Мои первые работы по восстановлению волнового фронта почти немедленно вызвали ответную реакцию. Роджерс [2] в Великобритании внес важный вклад в голографию, изготовив первую фазовую голограмму и развив теорию. В Калифорнии Альберто Баец [3], Хуссейн Эль-Сам и Киркпатрик [4] выполнили ряд интересных исследований по рентгеновской голографии. Со своей стороны я и мой коллега Госс построили голографический интерференционный микроскоп. Второе изображение в нем устранялось полностью довольно сложным методом наложения двух голограмм «в квадратуре» друг к другу. Реакция оптической промышленности на создание такого микроскопа была настолько разочаровывающей, и мы не публиковали статью на эту тему еще 11 лет, вплоть до 1966 г. [5]. Примерно в 1955 г. голография погрузилась в длительную спячку. В 1963 г. неожиданно, словно взрыв, наступило возрождение в связи с сообщением Лейта и Упатниекса об успешном изготовлении ими лазерной **)

---

*) Работа проводилась при финансировании Управлением научных и промышленных исследований (*первая субсидия, предоставленная промышленной лаборатории* этим управлением).

**) Меня не раз спрашивали, почему я не изобрел лазер. Фактически я о нем думал. В 1950 г., размышляя о полезности иметь интенсивный источник когерентного света, я вспомнил, что в 1921 г., будучи молодым студентом, в Берлине я услышал из уст самого Эйнштейна о его замечательном выводе закона Планка, в котором содержался постулат о существовании индуцированного излучения. Тогда у меня появилась идея об импульсном лазере: взять подходящий кристалл, изготовить из него резонатор с хорошо отражающим покрытием, заполнить верхний энергетический уровень путем освещения кристалла через маленькое отверстие и затем разрядить его взрывообразно лучом его собственного света. Я предложил эту идею в качестве темы диссертации на соискание степени доктора философии моему лучшему студенту, однако он отклонил ее, как слишком рискованную, а я не смог его разубедить, так как сам не был уверен в том, что можно будет найти подходящий кристалл.

голограммы в Мичиганском университете, Энн-Арбор. Их успех был обусловлен не только наличием лазера, но также продолжительными теоретическими исследованиями Лейта, которые были начаты в 1955 г. Об этих исследованиях не было известно ни мне, ни остальному миру, так как Лейт с коллегами Катроной, Палермо, Порчелло и Вивианом применил свою идею сначала в задаче о радиолокации с боковым обзором, которая в то время была засекречена [6]. Фактически их работы представляли двумерную голографию для электромагнитных волн, аналог «электронной» голографии. Длина электромагнитных волн, используемых в радиолокации, в 100 000 раз превосходит длину световых волн, в то время как

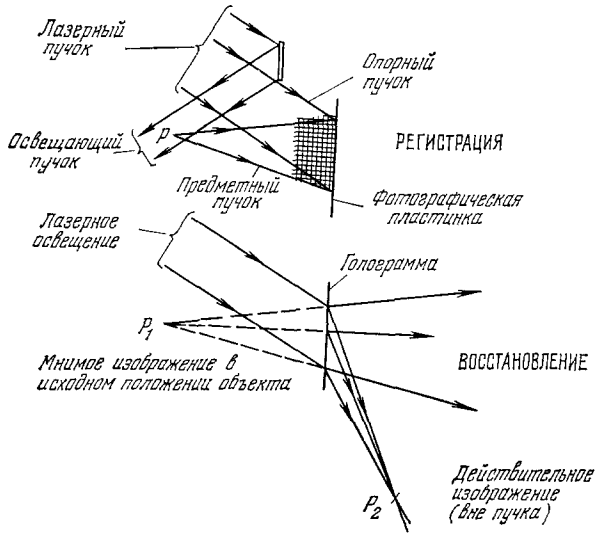


Рис. 8. Голография с наклонным опорным пучком [7a].

электронные волны примерно в 100 000 раз короче световых. Результаты работы Лейта и его коллег оказались блестящими, но, к сожалению, из-за отсутствия времени я не буду их здесь обсуждать.

С появлением лазера в 1962 г. Лейт и Упатниекс сразу же получили результаты существенно лучше моих за счет разработки нового, простого и очень эффективного метода устранения второго изображения [7]. Этот метод, заключающийся в использовании «наклонного опорного пучка», поясняется рис. 8. Метод Лейта и Упатниекса можно было реализовать благодаря большой длине когерентности излучения гелий-неонового лазера, которая даже в 1962 г. превышала длину когерентности излучения ртутной лампы примерно в 3000 раз. Именно это сделало возможным пространственно разделить опорный и освещающий пучки и послать опорный пучок вне объекта. В результате два восстановленных изображения оказались теперь разнесенными не только по глубине, но и по углу, величина которого равнялась удвоенному значению угла падения опорного пучка. Более того, интенсивность когерентного лазерного света превышала интенсивность ртутной лампы во много-много раз, что давало возможность использовать чрезвычайно мелкозернистую фотоэмульсию с низкой чувствительностью и, таким образом, создать голограмму больших размеров за разумные времена экспонирования.

На рис. 9 показаны два из самых первых восстановленных изображений, полученных Лейтом и Упатниексом в 1963 г. и по качеству сущест-

венно превосходящих любые из изображений, которые мне удалось сделать в 1948 г. Особый интерес должно вызвать то обстоятельство, что оба представленных изображения были восстановлены с *одной* голограммы, сформированной при разных положениях опорного пучка. Это явилось первым доказательством высокой емкости голограммы как запоминающего

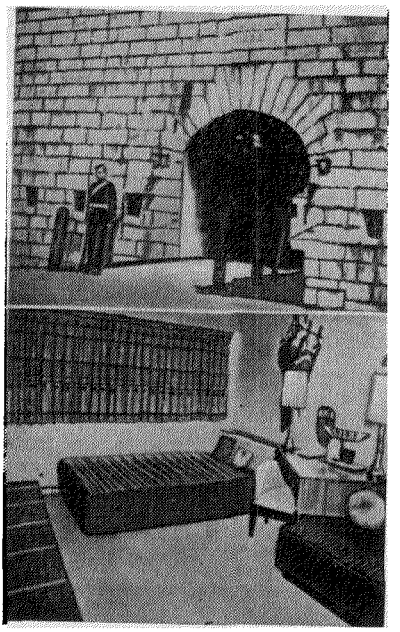


Рис. 9. Пример восстановления многих изображений с одной голограммы [76].

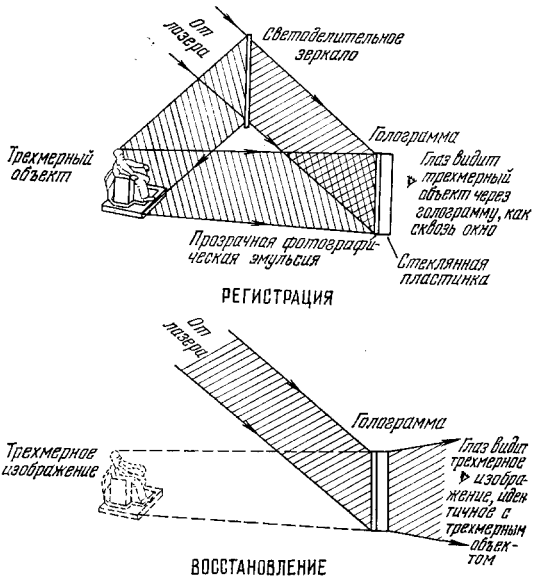


Рис. 10. Метод голографии трехмерного рассеивающего объекта с использованием лазерного света.

элемента. Вскоре Лейт и Упатниекс смогли накопить 12 различных картин на одной голограмме. В настоящее время можно записать 100 или даже 300 страниц печатного текста на площади, которая в обычной фотографии отводится на одну страницу.

Начиная с 1963 г. развитие голографии пошло очень быстрыми темпами. Наиболее ярким достижением первого года стала голография трехмерных объектов, изображения которых можно было рассматривать двумя глазами; конечно, голография с самого начала была трехмерной, однако в моих первых маленьких голограммах объемность можно было почувствовать только путем фокусировки по полю с помощью микроскопа или короткофокусного окуляра. Чтобы увидеть объемность, оказалось недостаточным только создать голограмму больших размеров; помимо этого требовалось, чтобы каждая точка фотопластинки «видела» каждую точку объекта. В первых же голограммах, полученных при узконаправленном освещении, информация от одной точки объекта была сосредоточена на малой площади в картине дифракции.

В случае рельефной поверхности объектов никаких специальных предосторожностей не требовалось. Небольшая рябь и выступы на поверхности рассеивают свет в широком конусе. Рис. 10 иллюстрирует пример установки для голографирования объекта с рельефной поверхностью,

такого, как статуэтка Авраама Линкольна. Трехмерное восстановленное изображение показано на рис. 11. При использовании объемной голограммы («фазовой голограммы») создается иллюзия самой статуэтки, как бы видимой через прозрачное окно (фотография любезно предоставлена проф. Дж. Строуком [8а] *)).

В случае нерассеивающего объекта, например транспаранта, «разбрасывание» информации по всей голограмме осуществляется путем освещения объекта через рассеиватель, которым может служить матовая стеклянная пластинка. Вид такой «диффузной» голограммы весьма необычен; она выглядит как картина шума (рис. 12). Такую голограмму можно назвать «идеальным кодом Шеннона». В своей книге «Теория связи» Клод

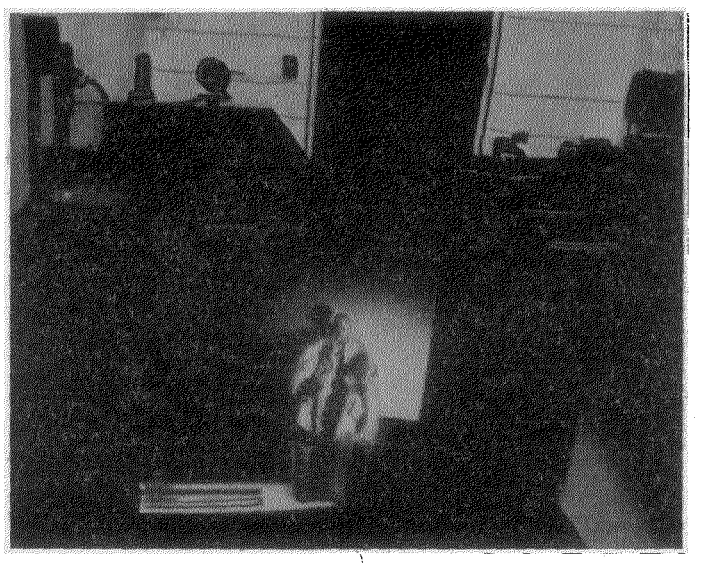


Рис. 11. Восстановленное трехмерное изображение скульптуры.
(С разрешения проф. Дж. Строука, Университет штата Нью-Йорк. Стони-Брук.)

Шеннон определил, что наиболее эффективным является кодирование, создающее впечатление исчезновения всех регулярностей сигнала, т. е. кодирование должно быть «шумоподобным». Но где же содержится информация в этом хаосе? Можно показать, что этот хаос не настолько нерегулярен, как представляется на первый взгляд, и совсем непохож на песчинки, случайно разбросанные на пластинке. Дифракционная картина объекта, имеющая довольно сложную форму, повторяется через случайные интервалы, но всегда в одном и том же виде и с одной и той же ориентацией.

Наиболее интересным и важным свойством диффузной голограммы является то, что любой небольшой фрагмент голограммы (достаточно большой, чтобы охватить дифракционную картину) содержит информацию о всем объекте. Поэтому изображение объекта можно восстановить по фрагменту голограммы, правда, с более интенсивным шумом. Таким образом,

*) Это одна из первых трехмерных голограмм, записанных в рассеянном свете Дж. Строуком [8б].

диффузная голограмма представляет собой *элемент распределенной памяти.* Данное обстоятельство вызвало многие догадки и вопросы о том, не является ли память мозга человека по своей природе голографической, поскольку хорошо известно, что значительная часть мозга может быть разрушена без стирания памяти. Ограниченное время не позволяет мне обсудить здесь этот животрепещущий вопрос. Я только хочу указать,

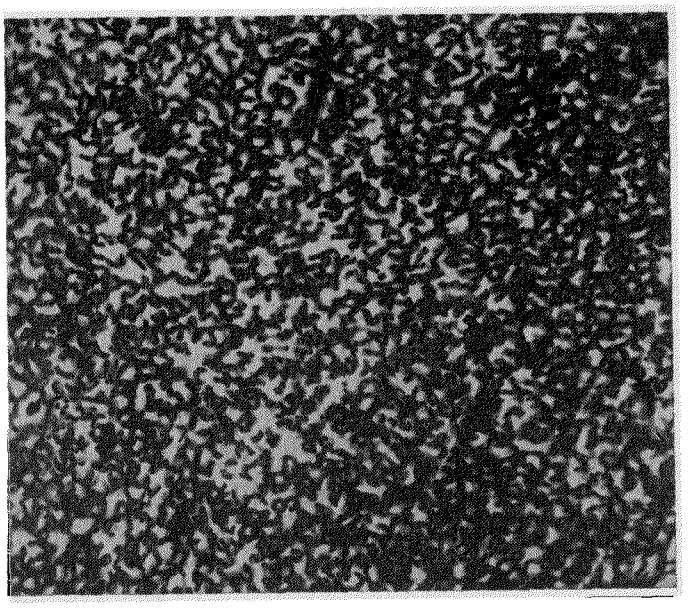


Рис. 12. Сильно увеличенное изображение микроструктуры голограммы, полученной при диффузном освещении. Информация передается с помощью «шумоподобного» кода [76].

что, по моему мнению, аналогия между памятью человека и голограммой является чисто функциональной, но, конечно, не структурной.

В ходе развития голографии наблюдалось, что чем меньше голограмма становилась похожей на объект, тем более совершенным получалось восстановленное изображение. Рис. 13 иллюстрирует прекрасное восстановление фотографии, созданное Лейтом и Упатниексом по диффузной голограмме, аналогичной представленной на предыдущем рисунке.

Пионерская работа в Мичиганском университете (Энн-Арбор) определила также процесс унификации голографической техники. В настоящее время сотни, если не тысячи, лабораторий имеют оборудование (рис. 14), состоящее из весьма устойчивой гранитной плиты или стального стола и различных оптических устройств для работы с когерентным светом, которые сейчас изготавливаются оптической промышленностью. Высокая механическая стабильность в голографии абсолютно необходима во всех работах, проводимых с помощью лазера непрерывного действия, так как смещение на четверть длины волны во время экспозиции может полностью испортить голограмму.

Тем не менее после 1963 г. возникли новые важные направления голографии, где высокая механическая стабильность не требовалась,

поскольку оказалось возможным формировать голограмму за малые доли микросекунды с помощью импульсного лазера.

Представьте, что вы раньше поставили перед физиком задачу: «Определить размер капелек выхлопных газов из сопла, движущихся со скоростью 2 М. Ожидаемые размеры имеют порядок нескольких микрометров

Рис. 13. Восстановленное изображение от плоского транспаранта — фотографии зала ресторана
Голограмма получена при диффузном освещении [7б].

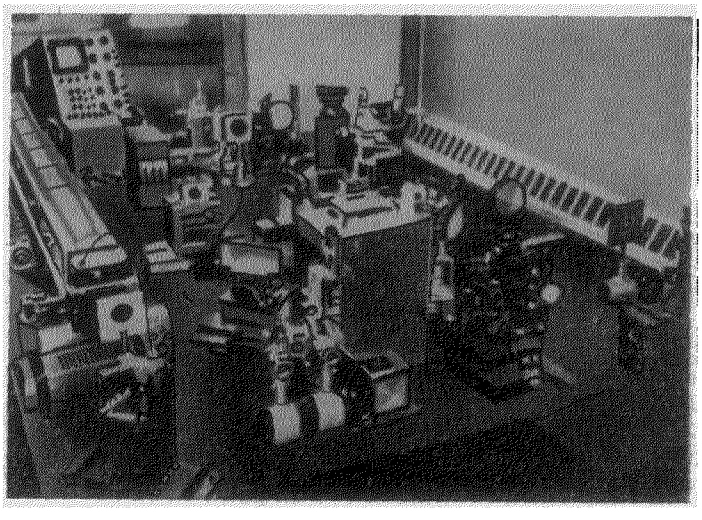


Рис. 14. Оборудование современной лаборатории голографии.
(С разрешения проф. Дж.Строука, Университет штата Нью-Йорк, Стони-Брук.)

и больше». Несомненно, он безнадежно опустил бы руки! Но теперь, чтобы решить эту проблему, следует всего-навсего зарегистрировать голограмму с прямым опорным пучком, разместив фотопластинку на безопасном рас-

стоянии от сопла и использовав рубиновый лазер с длительностью импульсов излучения 20—30 *нсек*. Затем необходимо получить «действительное» изображение (или же сформировать действительное изображение по мнимому с помощью обращенного освещающего пучка) и наблюдать в микроскоп трехмерное изображение потока, переходя от одной частицы к другой. Благодаря большому расстоянию возмущения от второго изображения полностью исчезают (рис. 15).

Как показали исследователи из лаборатории фирмы «TRW» (Редондо-Бич, Калифорния), на одной голограмме можно зарегистрировать все

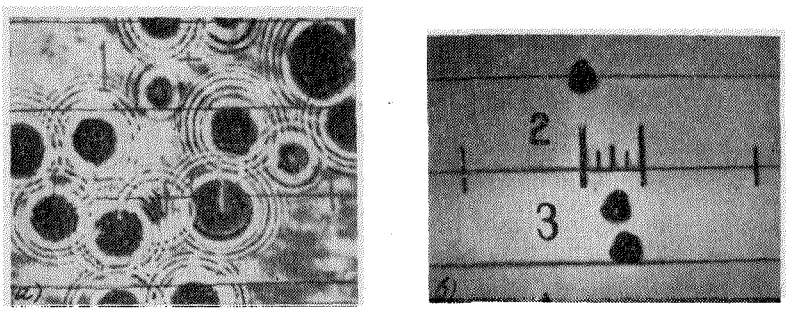


Рис. 15. Голографирование потока из сопла.

а) Голограмма аэрозольных частиц в струе; *б*) сфотографированные аэрозольные частицы. (С разрешения фирмы «Laser Holography, Inc.», Санта-Барбара, Калифорния.)

инфузории в полутораметровой толще мутной воды или же насекомые в метровом столбе воздуха. На рис. 16 представлены два восстановленных изображения насекомых, полученных Ноксом и Бруксом с одной голограммы при разных фокусировках по глубине. Нокс и Брукс также

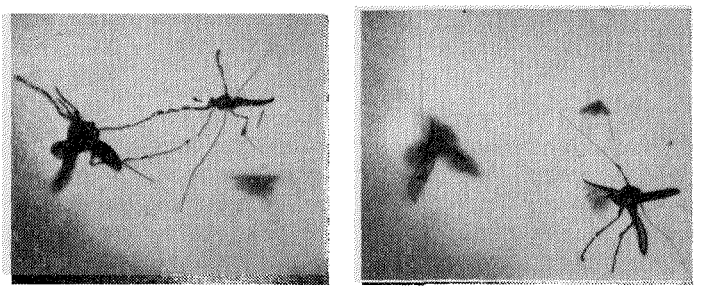


Рис. 16. Наблюдение москита в полете.

Оба изображения получены с одной голограммы. (С разрешения К. Нокса и Р. Брукса, фирма «TRW», Редондо-Бич, Калифорния.)

заснялн голографический кинофильм, в котором прослеживается полет одного москита на значительную глубину, если подбирать фокусировку для каждого нового кадра [9].

Сотрудники лаборатории «TRW» Ральф Вюркер и его коллеги открыли дверь в новое направление голографии — голографическую интерферометрию. На рис. 17 приведено восстановленное изображение пули при встрече ее ударных волн с другой ударной волной. Характерно, что это

не простое изображение, а интерферометрическое. Интерференционные полосы показывают *геометрическое место точек*, в которых запаздывание световой волны относительно световой волны, проходящей перед летящей пулей, равно целому числу длин волн. Информация об исходном состоянии воздуха регистрируется в первой экспозиции. Таким образом, указанная голограмма является голограммой с двойной экспозицией и более подробно будет рассмотрена ниже [10].

Рис. 18 иллюстрирует другое наивысшее достижение импульсной голографии: голографический трехмерный портрет, полученный Зибертом из фирмы «Conductron Corporation» (в настоящее время слившейся

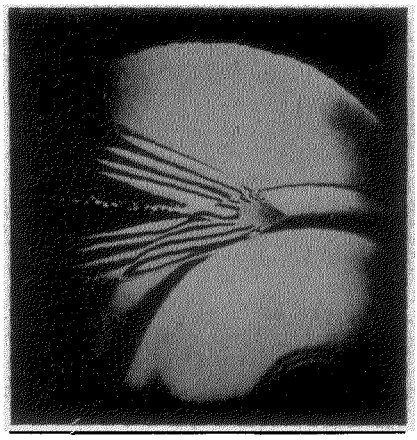


Рис. 17. Динамическая голографическая интерферометрия.

Восстановленное изображение получено с голографической интерферограммы; видно взаимодействие двух ударных волн в воздухе и их совместный поток. (С разрешения Р. Вюркера и его коллег, фирма «TRW», электронно-физическая лаборатория, Редондо-Бич, Калифорния.)

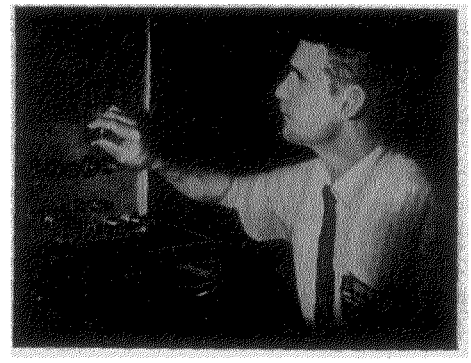


Рис. 18. Голографический портрет

(Л. Зиберт, «Conductron Corp.», в настоящее время слившаяся с фирмой «McDonnell — Douglas Electronics Co.», Сент-Чарлз, Миссури.)

с фирмой «McDonnell — Douglas Electronics Company», Сент-Чарлз, Миссури). Это достижение явилось результатом выдающейся работы по усовершенствованию лазера. Рубиновый лазер, впервые созданный Мейманом, давал короткие импульсы света, но длина когерентности излучения составляла всего несколько сантиметров. Это не создавало препятствий для голографии с прямым опорным пучком, когда опорная волна идет почти «в ногу» с дифрагированными волнами. Однако чтобы заголографировать сцену, содержащую отражающие объекты, глубиной 1 *м*, длина когерентности должна составлять по крайней мере 1 *м*. В настоящее время имеются лазеры, излучающие одномодовые импульсы света длительностью 30 *нсек* с энергией в пучке 10 *дж* и длиной когерентности 5—8 *м*. Такой лазер был недавно применен для изготовления моего голографического портрета, который демонстрировался на выставке перед лекцией.

В 1965 г. Пауэлл и Стетсон в Мичиганском университете (Энн-Арбор) сделали интересное открытие. Известно, что голографические изображения движущихся объектов получить не удается. Однако если воспользоваться методом двойной экспозиции сначала для покоящихся объектов, а затем для объектов, приведенных в колебание, то появятся полосы,

которые будут располагаться там, где смещение равно целому числу полуволн. На рис. 19 показана картина типов колебаний мембраны громкоговорителя, записанная в 1965 г. Пауэллом и Стетсоном [11], а на рис. 20 — колебаний деки гитары. Последняя фотография получена Стетсоном в лаборатории проф. Эрика Ингельстама [12a].

Весьма любопытно, что и интерферограммы, снятые группой сотрудников фирмы «TRW», и записи мод, полученные Пауэллом и Стетсоном,

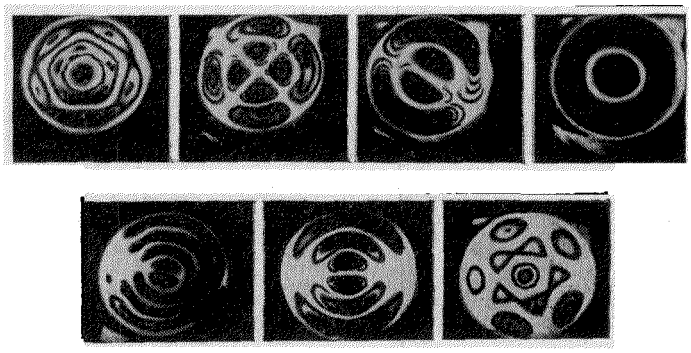


Рис. 19. Картина колебаний мембраны громкоговорителя, полученная методом голографической интерферометрии.
(Р. Пауэлл и К. Стетсон, Мичиганский университет, Энн-Арбор, 1965 г.)

появились до реализации интерференционного принципа в простейшем виде, хотя исторически его применение должно было предшествовать работам этих ученых (если бы, конечно, наука всегда следовала кратчайшим путем). Я имею в виду метод наблюдения малых деформаций твердых

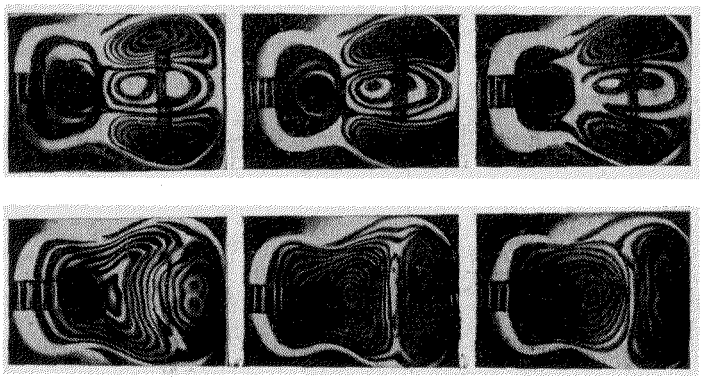


Рис. 20. Картина колебаний деки гитары, зарегистрированная методом голографической интерферометрии.
(С разрешения К. Стетсона и проф. Э. Ингельстама.)

тел с помощью дважды проэкспонированной голограммы. Данный метод заключается в следующем. Формируется голограмма тела в состоянии A, т. е. волна A как бы «замораживается» с помощью опорного пучка. Далее производится деформация тела до состояния B и формируется вторая голограмма на той же эмульсии и с тем же опорным пучком. Затем изготавливается транспарант и освещается опорным пучком. Таким образом,

две волны A и B, «замороженные» в разные моменты времени и никогда не соприкасающиеся друг с другом, оказываются восстановленными одновременно и интерферируют друг с другом. В результате на объекте появляются интерференционные кольца Ньютона, каждое из которых соответствует деформации тела в половину длины волны света. На рис. 21 показан прекрасный пример такой голографической интерферограммы, изготовленной Хэйнсом и Гильдебрандом в 1965 г. Этот принцип был открыт одновременно и независимо Берчем в Великобритании и Строуком и Лабейри в Энн-Арборе, Мичиган.

Метод неразрушающих испытаний (НРИ) с помощью голографической интерферометрии в настоящее время является самым важным промышленным применением голографии, послужившим отправным пунктом

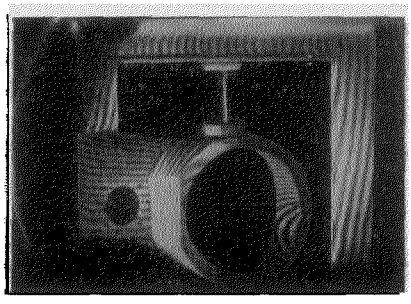


Рис. 21. Самый первый пример голографической интерферометрии с помощью двойной экспозиции.
(Б. Гильдебранд и К. Хэйнс, Мичиганский университет, Энн-Арбор, 1965 г.)

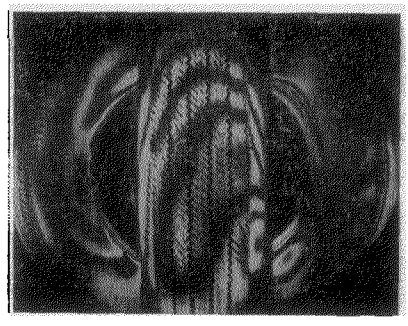
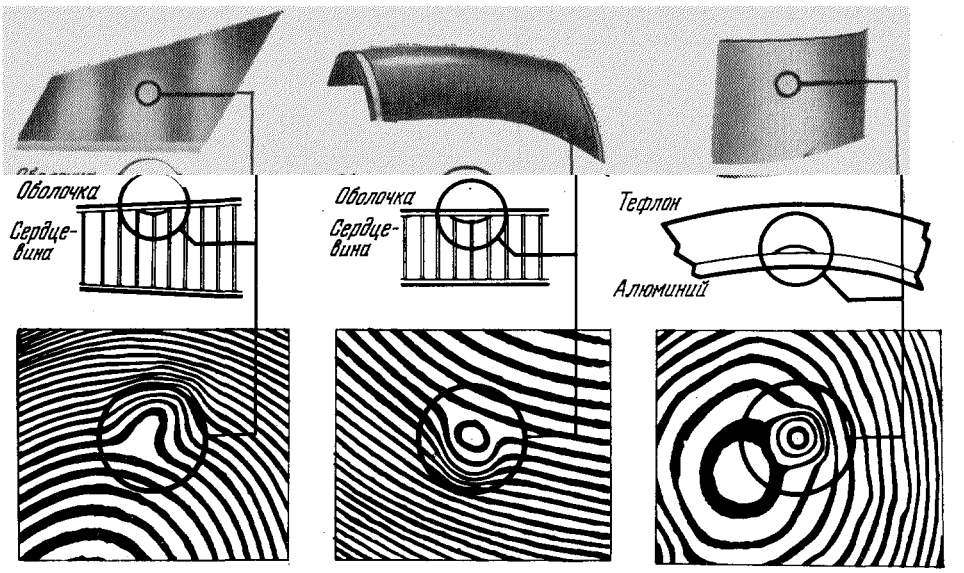


Рис. 22. Неразрушающее испытание с использованием методов голографии.
Голограмма с двойной экспозицией отображает две раковины в покрышке. (С разрешения Р. Гранта и фирмы «GCO», Энн-Арбор, Мичиган.)

для создания первой промышленной фирмы, базирующейся на голографии, «GCO» (ранее «G. C. Optronics»), Энн-Арбор, Мичиган. С разрешения фирмы «GCO» я привожу несколько примеров. Рис. 22 иллюстрирует результаты испытаний автомобильной покрышки. Передняя часть покрышки заголографирована непосредственно, а боковые части — с помощью двух зеркал (правого и левого). Испытания проводятся следующим образом. Сначала покрышка устанавливается на стенд и формируется первая голограмма. Затем на покрышку направляется струя теплого воздуха, и на той же пластинке формируется вторая голограмма. Если шина не имеет дефектов, то на полученной голограмме появляется лишь несколько широко разнесенных полос, что указывает на почти равномерную деформацию. Однако если склеивание слоев резины горячей вулканизацией было некачественным, то на голограмме обнаруживаются маленькие раковины, как видно на рис. 22 вблизи центра и в левом верхнем углу. Размеры раковин составляют лишь несколько тысячных долей миллиметра, но эти дефекты могли бы привести к серьезным последствиям. С другой стороны, можно проявить первую голограмму и установить ее точно в исходное положение; тогда деформацию покрышки можно наблюдать в «живом» виде.

Еще один пример неразрушающего испытания представлен на рис. 23. Все приведенные дефекты невозможно или почти невозможно обнаружить

другими средствами, но при использовании этого метода безошибочно определяются невооруженным глазом. На рис. 24, изображен один из образцов оборудования, выпускаемого «GCO», который, безусловно, производит глубокое впечатление. Здесь показан голографический анализатор



Лицевые листы этой сотовой конструкции состоят из 17 слоев волокон бора. Отсутствие связи между сердцевиной и оболочкой обнаруживается голографическим методом, как показано на фотографии внизу рисунка. Небольшое термическое напряжение приводит к искажению интерференционной картины над местом дефекта

а)

Эта слоистая алюминиевая оболочка канала была быстро проанализирована методом НРИ. На фотографии в середине рисунка видно, как интерференционные полосы оконтуривают дефектный участок. Метод НРИ позволяет локализовать участки образца, которые подвергаются испытанию. Этим методом могут быть обнаружены дефекты, размеры которых не превышают размеров ячейки сотовой структуры

б)

Разрыв в соединении тефлона и алюминия был легко обнаружен за несколько минут путем наблюдения образца со стороны слоя тефлона. Интерференционные картины, получаемые при использовании метода НРИ, могут быть сфотографированы, если необходима непрерывная регистрация

в)

Рис. 23. Пример неразрушающих испытаний (НРИ) с использованием голографических методов.

а) Композиционный материал, армированный волокнами бора (площадь 0,24 $м^2$ на сторону); *б*) алюминиевая конструкция (сотовая структура; площадь 2 $м^2$ на сторону); *в*) соединение тефлона с алюминием (площадь 0,55 $м^2$ на сторону). (С разрешения фирмы «GCO», Энн-Арбор, Мичиган.)

сотовой конструкции (как на рис. 23, *б*), которая применяется в крыльях самолета. Малейшие дефекты сварки алюминиевых слоев и сердцевины сразу же надежно выявляются.

Голографическая интерферометрия идеально подходит для обнаружения очень малых деформаций по интерференционным полосам, но ее единица измерения 1/4000 *мм* (расстояние между двумя интерференционными полосами) слишком хороша для контроля точности обрабатываемого изделия. Для этих целей пригоден другой голографический метод, называемый «оконтуриванием». Впервые он был введен Хэйнсом и Гильдебрандом в 1965 г. и в последнее время существенно улучшен Варнером из Мичиганского университета, Энн-Арбор. Сущность метода состоит в следующем. Изготавливаются две голограммы одного и того же объекта при двух

различных длинах волн, различающихся между собой, например, на один процент. Возникающие *биения* между двумя системами интерференционных полос приводят к увеличению расстояния между полосами до 1/40 *мм*, что и требуется для контроля обработки деталей на станках (рис. 25).

От промышленного применения голографии я теперь перейду к еще одному важному развитию голографии. В 1962 г., как раз накануне «голографического взрыва», советский физик Ю. Н. Денисюк опубликовал

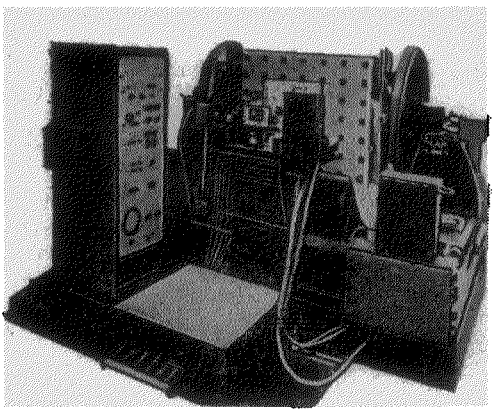


Рис. 24. Голографический анализатор слоистых структур (Энн-Арбор, Мичиган).

Рис. 25. Контурная карта медали, изготовленная голографическим методом, который был разработан Б. Гильдебрандом и К. Хэйнсом [12б].

Метод улучшен Дж. Варнером, Мичиганский университет, Энн-Арбор, 1969 г.

важную статью [13], где высказал идею соединения метода голографии с остроумным методом цветной фотографии, за который Габриэль Липпман в 1908 г. получил Нобелевскую премию. Рис. 26 иллюстрирует метод Липпмана и идею Денисюка. Липпман изготовил очень мелкозернистую эмульсию, содержащую коллоидное бромистое серебро, на подложке из ртути, которая служила в качестве зеркала. Свет, упавший на эмульсию, отражался от зеркала и вместе с падающей волной создавал систему стоячих волн. Зерна коллоидного серебра выпадали в осадок на участках, где располагались максимумы электрического вектора. Расстояния между образованными слоями составляли почти половину длины волны. После проявления совокупность слоев, освещенных белым светом, отражала только узкую полосу длин волн вокруг цвета первичного света, поскольку только для этого цвета волны, рассеянные на слоях Липпмана, складывались в фазе.

Предложение Денисюка показано на другой диаграмме. Предметная и опорная волны попадают на эмульсию с двух противоположных сторон. Вновь образуются стоячие волны и слои Липпмана, однако они оказываются не параллельными плоскости эмульсии, а ориентированными по биссектрисе угла между двумя волновыми фронтами. Если такую эмульсию после проявления осветить опорной волной, то появится изображение объекта в исходном положении и в естественных цветах (при условии отсутствия усадки эмульсии).

Несмотря на высокое искусство экспериментатора, из-за отсутствия лазера, в 1962 г. Ю. Н. Денисюк смог провести лишь «доказательство существования». Цветная отражающая голограмма, которую можно было освещать белым светом, была впервые изготовлена в 1965 г. Строуком и Лабейри [14а], а двухцветный ее вариант (рис. 27 *)) — позднее Лином, Пеннингтоном, Строуком и Лабейри [14б].

С тех пор техника изготовления одноцветных отражающих голограмм была доведена до высокого уровня Пеннингтоном [15] и другими с помощью

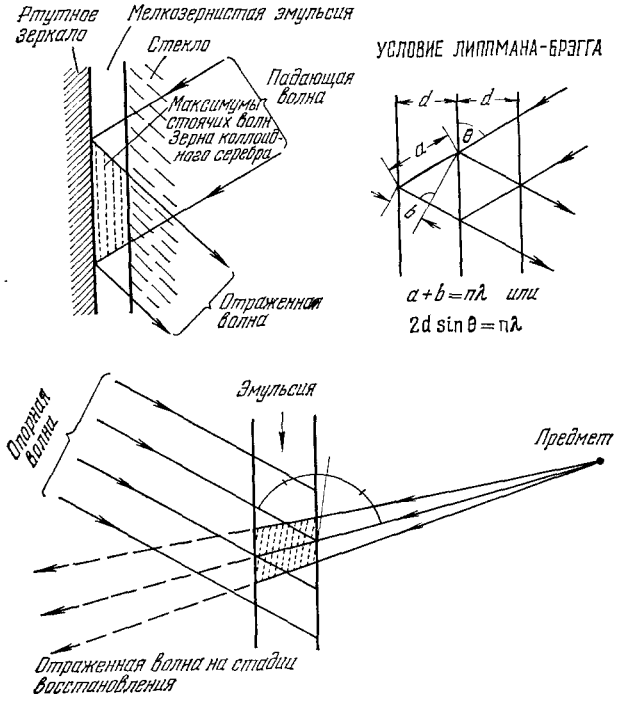


Рис. 26. Отражающая голограмма Липпмана—Денисюка, восстанавливающая изображение предмета в естественных цветах.

нового фотографического процесса. Коэффициент отражения приблизился к 100%, однако двух- и тем более трехцветные голограммы все еще далеки от совершенства. Одна из моих главных забот в настоящее время состоит в улучшении этого положения, однако обсуждение данной проблемы заняло бы слишком много времени, и пока еще слишком рано говорить об этом.

Область применения голографии, которая приобретет большое значение в ближайшие годы, — это хранение информации. Выше я уже упоминал, что методы голографии позволяют записать на заданном участке фотоэмульсии в 100—300 раз больше страниц печатного текста, чем методы обычной микрофотографии. Даже без учета размера по глубине эмульсии выигрыш превышает 50. Причина кроется в том, что диффузная голограмма является почти идеальным случаем кодирования с полным

*) Цветное изображение этой фотографии можно найти на обложке шестого номера переводного журнала ТИИЭР за 1972 г., выпускаемого изд-вом «Мир». (*Прим. ред.*)

использованием площади и градаций эмульсии, в то время как при печати информации используется всего около 5—10% площади эмульсии, а градации отсутствуют совсем. Дополнительное повышение емкости возникает за счет третьего измерения, глубины эмульсии. На эту возможность впервые указал Ван-Херден в 1963 г. в своей оригинальной статье [16]. По теоретическим оценкам один бит информации можно накопить в кубе со стороной, равной длине волны. Практические результаты еще очень далеки от этого предела, однако коэффициент 300, который упоминался ранее, является совершенно реальным.

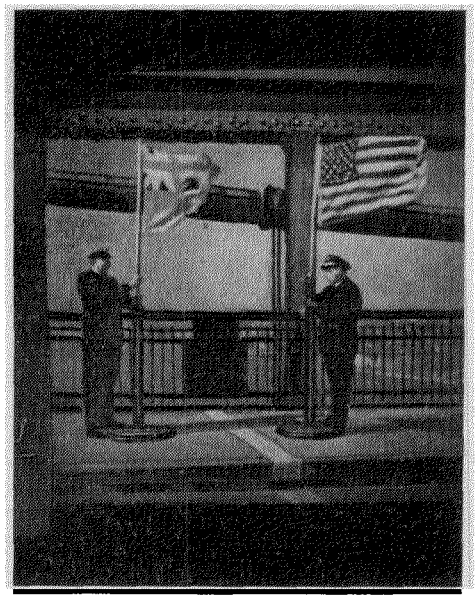


Рис. 27. Первая двухцветная отражающая голограмма.
Восстановленное изображение получено в белом свете Дж. Строуком и А. Лабейри, 1965 г.

Однако даже без учета этого большого коэффициента голографическая система памяти имеет важные преимущества. Двоичная память в форме картины типа шахматной доски на микрофильме легко может быть испорчена всего лишь одной пылинкой, волосом или царапиной, в то время как диффузная голограмма почти нечувствительна к таким дефектам. Голографическое накопительное устройство (рис. 28), как отметил его автор Андерсон [17] (1968 г.), является всего лишь скромным началом. Это устройство способно произвести считывание информации с любой из 64×64 печатных страниц за время около одной микросекунды. Каждая голограмма диаметром 1,2 *мм* может содержать около 10^4

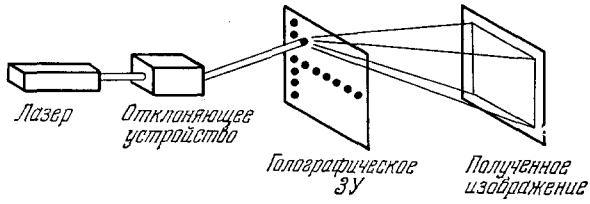


Рис. 28. Голографическая система памяти с бегущим лучом.
(Л. Андерсон и Р. Колье, фирма «Bell Telephone», 1968 г.)

бит информации. Последовательное считывание такой информации за микросекунду потребовало бы, конечно, чрезмерно большой полосы частот, и можно говорить лишь о мощных устройствах параллельного считывания. С уверенностью можно предвидеть огромное расширение этих «скромных начал», стоит только серьезно взяться за реализацию проекта создания общего фонда памяти.

Распознавание образов и символов является еще одним применением голографии, которое, по-видимому, находится только на ранней стадии развития. Мне следует лишь кратко упомянуть фундаментальную работу Ван-дер-Люгта [18а] по распознаванию образов. Принцип распознавания символов можно уяснить с помощью рис. 29.

Давайте теперь немного обобщим основной принцип голографии. Во всех предыдущих примерах сложный предметный пучок интерферировал с простым плоским или сферическим опорным пучком. Предметный пучок восстанавливался при освещении голограммы опорным пучком. Между тем простейшие математические преобразования показывают, что

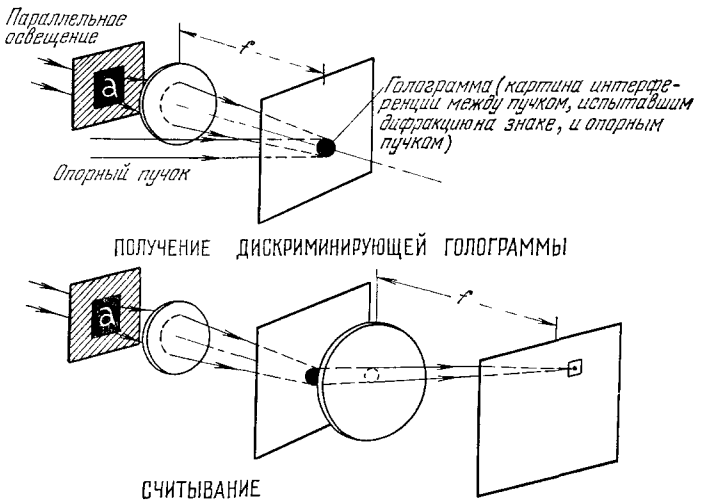


Рис. 29. Принцип распознавания символов с помощью голографии.

все это относится и к любому опорному пучку, лишь бы он *остро коррелировал сам с собой*. Функция корреляции является инвариантом пучка и может быть вычислена в любом поперечном сечении. С первого взгляда становится ясно, что сферическая волна остро коррелирует с собой, так как она выходит из «точки». Однако существуют другие пучки, которые остро коррелируют с собой, например пучки, выходящие из транспаранта с отпечатком пальцев или с китайским иероглифом, а в предельном случае — пучки, выходящие из матового стекла. Следовательно, с помощью голограммы вполне возможно осуществить перевод, скажем, китайского иероглифа в соответствующее английское предложение и *наоборот*. Недавно Баттерс и Уолл в Университете Лафборо создали голограмму, которая на основании портрета выдает подпись владельца и *наоборот* (см. [18б]). Иными словами, голограмма может быть довольно универсальным преобразующим устройством (переводчиком). Например, она может переводить знак, который мы умеем прочесть, в другой знак, который умеет читать вычислительная машина.

На рис. 29 показана довольно скромная реализация этого принципа. С помощью плоского опорного пучка изготовлена голограмма буквы «а». Если эту голограмму осветить предметным пучком от буквы «а», то восстановится опорный пучок, который может возбудить небольшой фотоэлемент, находящийся в определенном положении. Я полагаю, что это дает представление о самом принципе. Правда, практическое воплощение

такой системы связано с большими трудностями, хотя бы потому, что существует много способов изображения одной и той же печатной буквы. Но я не буду останавливаться на этих проблемах, поскольку их обсуждение заняло бы слишком много времени.

С разработкой устройств распознавания символов мы уже на полшага оказываемся в будущем. По всей видимости, они станут особенно важными только для следующего поколения вычислительных машин или роботов, которым мы должны передать немного человеческого интеллекта. Теперь я хочу кратко упомянуть о некоторых других проблемах, которые уводят нас в будущее более чем на полшага.

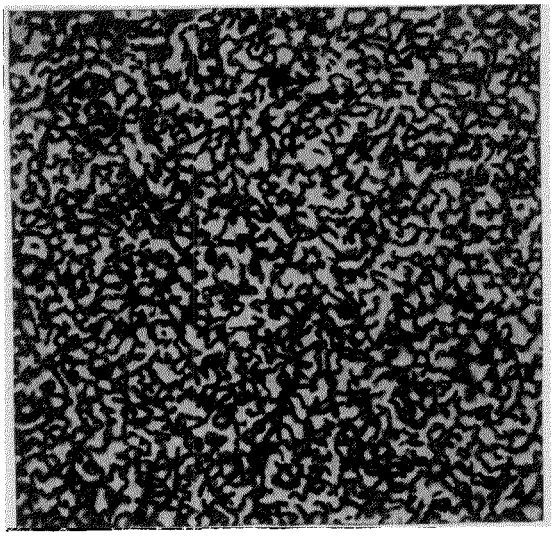


Рис. 30. Лазерная зернистость (вид белого листа бумаги, равномерно освещенного лазерным светом).

Чрезвычайно актуальной является проблема устранения зернистости лазерного света. Каждый, кто впервые смотрит на предмет в лазерном свете, поражается грубым видом объектов, которые мы обычно считаем гладкими. Белый лист бумаги выглядит, как будто по нему ползают муравьи. Эффект «ползания» вызывается за счет постоянного движения глаза, но грубый вид бумаги — это реальность. Такое явление называется «лазерной зернистостью». Характерный пример показан на рис. 30, где изображен белый лист бумаги в лазерном свете, если смотреть на него через оптическую систему с низким разрешением. В действительности это не шум, а информация, которая нам не нужна, информация о микроскопических неровностях бумаги, которая нас не интересует. Что же мы можем сделать против этого?

В случае грубых объектов единственный выход, к сожалению, заключается в том, чтобы произвести усреднение по большим площадям и, таким образом, сгладить отклонения. Это означает, что мы должны выбросить бóльшую часть информации, желательную и нежелательную. Конечно, это довольно прискорбно, но других способов нет; к счастью, в большинстве случаев мы имеем достаточный объем информации, чтобы безболезненно поступиться ее частью. Выше я уже показывал некоторые вполне удовлетворительные изображения, восстановленные с диффузной голограммы. Однако существует ряд важных областей, в которых мы можем сделать существенно больше и где устранение зарнистости очень нужно. Я имею в виду использование микроголограмм для хранения и отображения информации. С целью создания устойчивости к пыли и царапинам микроголограммы изготовляются диффузного типа, но тем самым вводится зернистость. Для устранения зернистости размер голограммы приходится выбирать в настоящее время значительно бóльшим, чем требуется в идеальном случае. Недавно я показал [19], что достоинства диффузных голо-

грамм могут быть полностью сохранены, а зернистость полностью устранена, если воспользоваться специальной освещающей системой вместо матового стекла. Это, как я надеюсь, даст дополнительное повышение плотности информации в голографических запоминающих устройствах.

А теперь сделаем еще более решительный шаг в будущее. Я хочу кратко упомянуть о моих двух любимых голографических идеях-детищах. Первая из них — это панорамная голография, или, как ее можно назвать, голографическое искусство.

Все трехмерные голограммы, изготовленные до сих пор, захватывают глубину пространства лишь до нескольких метров. Нельзя ли глубину

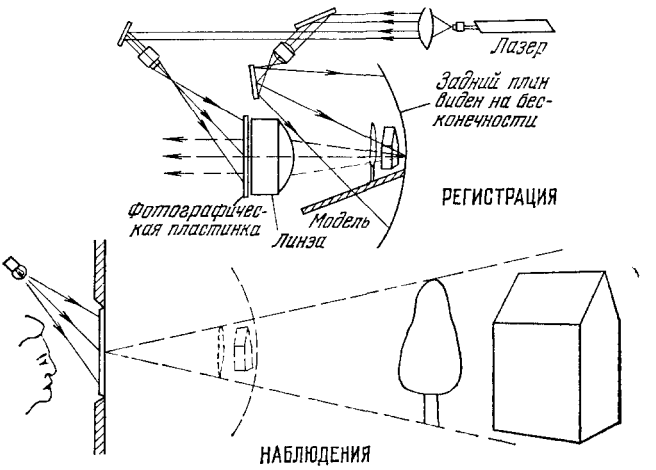


Рис. 31. Панорамная голография.

продолжить до бесконечности? Нельзя ли установить голограмму на стене, через которую, как сквозь окно, можно будет видеть ландшафт, наблюдая действительное или мнимое изображение? Я думаю, что это вполне реально, только это будет не фотография, а своего рода искусство витража. На рис. 31 показан процесс получения панорамной голограммы. Художник создает модель, искаженную таким образом, что она выглядит в перспективе и простирается на любое расстояние, если смотреть на нее через большую линзу, размеры которой совпадают с размерами голограммы. Художник может использовать и меньшую линзу, но достаточно большую, чтобы при создании модели смотреть через нее двумя глазами. Далее изготавливается отражающая голограмма модели и затем освещается сильным точечным источником света. Наблюдатель увидит пластинку как бы через линзу; иначе говоря, сцена будет простираться на любое расстояние с естественной передачей цветов. Такая система в настоящее время разрабатывается, но для получения удовлетворительных результатов потребуются еще значительные усилия; при этом в первую очередь необходимо существенно улучшить коэффициент отражения трехцветных голограмм.

Еще более грандиозной системой, которая, вероятно, будет реализована в более отдаленном будущем, является трехмерная кинематография без наблюдательных средств типа поляроидных пленок. Идея представлена на рис. 32. Весь зрительный зал (в одной или двух плоскостях) разбивается на зоны видения (одна для правого глаза, другая для левого) шири-

ной, равной нормальному расстоянию между глазами, и пустые участки между парами зон. Два глаза должны видеть две различные картины (стереоскопическую пару). Зритель может сдвигать голову немного вправо или влево. Даже если его глаз попадает в пустой участок, картина будет выглядеть темнее, но не плоской, так как один глаз дает впечатление «стереоскопии по недостатку».

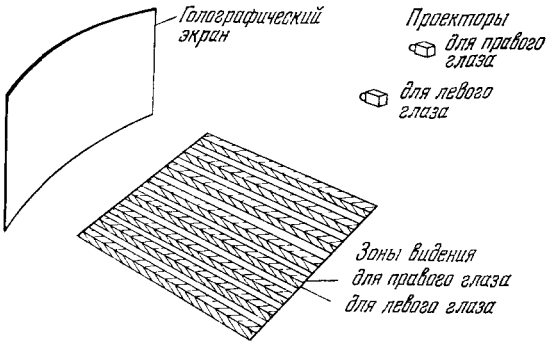


Рис. 32. Объемная кинематография с помощью голографического экрана.

Непосредственно до открытия голографии я затратил несколько лет на поиски решения этой проблемы, пока не понял, что она не может быть строго решена с помощью ортодоксальных средств оптики, растровых экранов, зеркал и призм. Можно изготовить удовлетворительные небольшие экраны для малых залов, однако возникает дилемма для больших экранов и больших залов. Если растры или нечто подобное имеют большие размеры, то они будут видны с передних сидений; если же они малы, то ничего не будет видно с задних мест.

Несколько лет назад я понял, к своему удивлению, что голография может решить также и эту проблему. В качестве опорного источника следует использовать проектор, а в качестве объекта, например, систему зон видения для левого глаза. Экран, покрытый эмульсией Липпмана, превратится автоматически в очень сложную оптическую систему, которая при проектировании картины проектором обеспечит ее видимость только из зон для левого глаза. Процесс следует повторить для правого проектора и для зон правого глаза. Объемная голограмма Липпмана — Денисюка воспроизведет явление с избирательностью к направлению. Если повернуть осветитель из исходного положения на некоторый угол, то не появится никакого отражения. При установке двух проекторов под этим углом (или несколько бо́льшим) друг к другу правая картина не будет видна левым глазом, и *наоборот*.

И все же остается одна трудность, заключающаяся в том, что практически нельзя применить голографию в масштабе зала, даже изготавливая фотопластинку размером с экран. Однако и эту проблему можно решить, если сделать экран из небольших фрагментов и использовать не зал, а *модель* зала, рассматривая ее через линзу, точно так же как в панорамной голографии.

Я надеюсь, что мне удалось доказать реальность системы, и уверен, что передал также трудности ее осуществления. Однако я не могу сказать, будут ли эти трудности преодолены в этом веке или в следующем.

Практическое воплощение грандиозных программ, к которым я питаю прирожденную склонность, займет длительное время. Как я отметил в начале лекции, я буду счастлив, если увижу при своей жизни реализацию голографического электронного микроскопа, к разработке которого я приступил 24 года тому назад. Теперь мои надежды значительно окрепли в связи с серьезным успехом Строука [20] (рис. 33). Проф. Строук недавно применил голографический метод отфильтровывания для улучшения разрешающей способности на размытой микрофотографии, полу-

ченной проф. Альбертом Кру (Чикаго, Иллинойс) с помощью пропускающего растрового электронного микроскопа. Строук добился повышения разрешения с 5 до 2,5 Å. Использованную схему пока еще нельзя назвать голографическим электронным микроскопом, поскольку исходное изображение не было сформировано в когерентном пучке электронов. Однако методы Кру и Строука настолько мощные, что я верю в их успех на очередном, более важном и грандиозном этапе разработок.

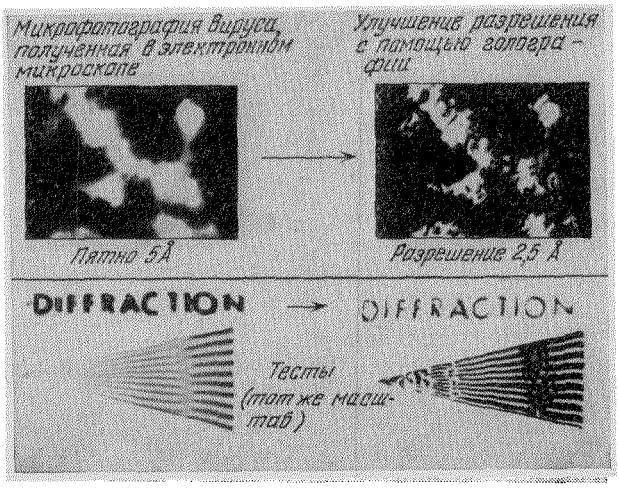


Рис. 33. Микрофотография в пропускающем растровом электронном микроскопе (проф. А. Кру, Чикагский университет), размытие в которой устранено голографическим методом (проф. Дж. Строуком в 1971 г.).

Нижние две фотографии показывают, что эффект размытия не может быть устранен фотопечатью с повышенным контрастом. Голографический метод дает возможность исправить фазы только части пространственных частот.

В заключение я хотел бы сказать, что являюсь одним из немногих физиков, которым посчастливилось увидеть, как их идеи и замыслы выросли в новый большой раздел физики. Я отдаю себе полный отчет в том, что это достижение армии молодых, талантливых исследователей-энтузиастов, среди которых я упомянул имена лишь немногих. Мне хочется выразить им свою искреннюю благодарность за то, что своими исследованиями они способствовали присуждению мне самой высокой премии в науке.

ЛИТЕРАТУРА *)

Книги:

Applications of Holography, ed. by E. S. Barrekette, W. E. Kock, T. Ose, J. Tsujiuchi and G. W. Stroke, N.Y., Plenum Press, 1971.

H. J. Caulfield, S. Lu, The Applications of Holography, N.Y., Wiley—Interscience, 1970.

R. J. Collier, C. B. Burckhardt, L. H. Lin, Optical Holography, N.Y., Academic Press, 1971 (изд-во «Мир» в 1973 г. выпустит перевод: Р. Кольер, К. Бёркхарт, Л. Лин, Оптическая голография).

*) Невозможно отдать должное сотням авторов, которые внесли существенный вклад в развитие голографии. Число статей превышает 2000, имеется более дюжины книг на многих языках. Подробную библиографию можно найти, например, в книге «Голография» (N.Y., Optosonic Press, 1969—1970), выпущенной под редакцией Т. Каллара.

J. B. DeVelis, G. O. Reynolds, Theory and Applications of Holography, Reading, Mass., Addison—Wesley, 1967.
The Engineering Uses of Holography, ed. by E. R. Robertson and J. M. Harvey, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1970.
М. Франсон, Голография, М., «Мир», 1972.
H. Kiemle, D. Röss, Einführung in die Technik der Holographie, Frankfurt am Main, Akademische Verlagsgesellshaft, 1969; издано и в США: Introduction to Holographic Techniques, N.Y., Plenum Press, 1972.
У. Е. Кок, Лазеры и голография. Введение в когерентную оптику, М., «Мир», 1971.
Ю. И. Островский, Голография, Л., «Наука», ЛО, 1970.
G. W. Stroke, An Introduction to Coherent Optics and Holography, N.Y., Academic Press, 1st ed.— 1966, 2nd ed.— 1969 (имеется перевод 1-го изд.: Дж. Строук, Введение в когерентную оптику и голографию, М., «Мир», 1967).
J. Ch. Vienot, P. Smigielski, H. Royer, Holographie Optique (Developpements. Applications), P., Dunod, 1971 (изд-во «Мир» в 1973 г. выпустит перевод: Ж. Вьено, П. Смигельский, Х. Ройе, Оптическая голография и ее применения).

Статьи (цитированные):

1. D. Gabor, *а*) Nature **161** (409), 777 (1948); *б*) Proc. Roy. Soc. (L.) **A197**, 454 (1949) (переведено в виде приложения I в книге Дж. Строука (М., «Мир», 1967)); *в*) Proc. Phys. Soc. (L.) **B64** (pt. 6), 449 (1951) (см. перевод, как в [1б]).
2. G. L. Rogers, Proc. Roy. Soc. (Edinburg) **A63**, 193 (1952).
3. A. Baez, Nature **169**, 963 (1952).
4. H. M. A. El-Sum, P. Kirkpatrick, Phys. Rev. **85**, 763 (1952).
5. D. Gabor, W. P. Goss, J. Opt. Soc. Am. **56**, 849 (1966).
6. L. J. Cutrona, E. N. Leith, L. J. Porcello, W. E. Vivian, Proc. IEEE **54**, 1026 (1966) (см. перевод: ТИИЭР 54(8), 11 (1966)).
7. E. N. Leith, J. Upatnieks, J. Opt. Soc. Am. *а*) **53**, 522, 1377 (1963); *б*) **54**, 1295 (1964).
8. *а*) D. Gabor, W. E. Kock, G. W. Stroke, Science **173** (3991), 11 (1971) (см. перевод: УФН **107**, 443 (1972)); *б*) G. W. Stroke, Theoretical and Experimental Foundations of High-resolution Optical Holography (Presented in Rome on September 14, 1964); также в сборнике Publicazioni IV Contenario della Nascita di Galileo Galilei, v. 2, Firenze, G. Barbera, 1966.
9. C. Knox, R. E. Brooks, Proc. Roy. Soc. (L.) **B174**, 115 (1969).
10. G. W. Stroke, A. E. Labeyrie, Appl. Phys. Lett. **8**, 42 (1966); L. O. Heflinger, R. F. Wuerker, R. E. Brooks, J. Appl. Phys. **37**, 642 (1966).
11. J. M. Burch, Production Engineer **44**, 431 (1965); R. L. Powell, K. A. Stetson, J. Opt. Soc. Am. **55**, 1593 (1965).
12. *а*) K. A. Stetson, Thesis (under direction of E. Ingelstam), Royal Institute of Technology, Stockholm, 1969; *б*) B. P. Hildebrand, K. A. Haines, J. Opt. Soc. Am. **57**, 155 (1967).
13. Ю. Н. Денисюк, ДАН СССР **144**, 1275 (1962).
14. *а*) G. W. Stroke, A. E. Labeyrie, Phys. Lett. **20**, 368 (1966); *б*) L. H. Lin, K. S. Pennington, G. W. Stroke, A. E. Labeyrie, Bell. Syst. Tech. J. **45**, 659 (1966).
15. K. S. Pennington, J. S. Harper, Appl. Opt. **9**, 1643 (1970).
16. P. J. van Heerden, ibid. **2**, 387 (1963).
17. L. K. Anderson, Bell. Lab. Rec. **46**, 318 (1968).
18. *а*) A. van der Lugt, IEEE Trans. Inform. Theory **IT-10**, 139] (1964); *б*) B. de Ferranti, Proc. Roy. Inst. Great Britain, 165 (Aug. 1971).
19. D. Gabor, IBM J. Res. and Develop. **14**, 509 (1970).
20. G. W. Stroke, Optica Acta **16**, 401 (1969); New Scientists **51**, 1671 (1971); G. W. Stroke, M. Halioua, Optik **35**, 50 (1972).

21*. Л. Мерц, Интегральные преобразования в оптике, М., «Мир», 1969 *).
22*. M. Wolfke, Phys. Zs. **21**, 495 (1920).

*) Звездочкой помечена литература, доставленная при переводе. (*Прим. ред.*)