

МОЙ ПУТЬ В ГОЛОГРАФИИ*

Ю.Н. Денисюк

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН



14 мая 2006 г. после тяжелой и продолжительной болезни скончался выдающийся российский ученый, признанный учеными всего мира одним из пионеров нового направления в оптике – голографии, заведующий лабораторией оптоэлектроники и голографии ФТИ им. А.Ф. Иоффе, академик Юрий Николаевич Денисюк.

Юрий Николаевич родился 27 июля 1927 года в г. Сочи. Его мать была коренной ленинградкой, и семья переехала в Ленинград. Военные годы он провел в блокадном Ленинграде. В 1948 г. Ю.Н. Денисюк поступил в Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО), который и закончил в 1954 году, получив по окончании диплом с отличием. С 1954 г. он был принят на работу в Государственный оптический институт (ГОИ) им. С.И. Вавилова, в котором проработал до последнего времени. Одновременно с 1980 по 1988 гг. он был профессором в ЛИТМО. В 1988 г. Юрий Николаевич был избран заведующим лабораторией оптоэлектроники и голографии ФТИ им. А.Ф. Иоффе, оставаясь им до последних дней жизни, одновременно сохраняя ведущие посты в ГОИ. Свою пионерскую работу "Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения" он опубликовал в 1962 г. в ДАН СССР. Фактически им была открыта объемная голографическая запись, сыгравшая затем огромную роль в различных применениях голографии в науке и практике. В своей нобелевской речи Д. Габор, предложивший метод записи и восстановления волнового фронта (голографию) в 1949 г., особо отметил эту работу Юрия Николаевича. Голландский ученый Ван Хирден, также написавший о возможности объемной записи голограмм в 1963 г., тоже признал приоритет Ю.Н. Денисюка в этом, очень важном направлении. Эта и последующие работы Юрия Николаевича сделали его после смерти Габора лидером среди ученых-голографистов, и за рубежом была создана инициативная группа по выдвижению Ю.Н. Денисюка и Э. Лейта

(США) на Нобелевскую премию. Работы последних инициировали поток новых исследований в области голографии. Активно способствовал развитию этих работ вице-президент АН СССР академик Б.П. Константинов, по инициативе которого в 1970 г. был создан Научный совет АН СССР по проблеме "Голография". В 1970 г. академик-секретарь отделения общей физики и астрономии АН СССР Л.А. Арцимович выдвинул кандидатуру Ю.Н. Денисюка в члены-корреспонденты АН СССР. Эта кандидатура была поддержана общим собранием академии. В это время Юрий Николаевич был еще кандидатом наук. Однако вскоре, в 1972 году, докторская степень была ему присуждена без защиты диссертации. В 1970 г. ему за цикл работ "Голография с записью в трехмерных средах" была присуждена Ленинская премия. Работая в ГОИ, Юрий Николаевич сумел увлечь своими работами большую группу талантливых научных сотрудников и в 1974 году он уже возглавлял отдел ГОИ. В этом отделе развивались различные направления голографии, были созданы первые объемные голограммы с восстановлением изображений в белом свете, следствием чего было создание во многих странах голографических выставок и музеев. За серии работ по развитию фундаментальных основ оптики ему дважды, в 1982 и в 1989 году, были присуждены Государственные премии. В 1992 году он был избран действительным членом Российской академии наук. Юрий Николаевич был избран почетным членом Королевского фотографического общества Великобритании (1987 г.) и почетным членом Международного Общества оптической инженерии SPIE (1998 г.). Ему были также присуждены награда международной организации "Интеркамера" (1971), премия Дениса Габора (SPIE, 1983), медаль прогресса Королевского фотографического общества Великобритании (1987), премия Р.В. Вуда Оптического общества Америки (1992); он был избран почетным доктором университета ДеМонфорт (De Montfort) (Англия, 1999).

Юрий Николаевич обладал необыкновенной работоспособностью, которая дополняла его способность быстро и глубоко проникать в суть решаемой проблемы. Он давал основные указания по проведению экспериментов и сам активно в них участвовал, не перекладывая на своих подчиненных написания статей, докладов и отчетов, стремясь все это делать лично, а в исключительных случаях, когда ему приносили черновики, проверял все записанные положения. Он внимательно прислушивался к мнениям сотрудников по работе и был отзывчив, когда к нему обращались с просьбой разъяснить суть какой-либо проблемы. Юрий Николаевич был требователен к себе и был в меру требовательным к своим сотрудникам. Но он очень не любил не ак-

* Статья "My way in holography" опубликована в журнале *Leonardo*, 1992, V.25, N5, PP.425-430 (Pergamon Press).

куратно сделанные работы, легковесность суждений, и в этих случаях был достаточно строг.

Много сил Юрий Николаевич отдал на развитие голографии в стране и на воспитание научных кадров. Последние 15 лет он был председателем Научного совета по проблеме "Голография" при президиуме РАН, организовав проведение более десятка конференций и около трех десятков школ, в которых сам принимал деятельное участие. Несколько лет он был руководителем научной школы его имени.

Нет сомнения, что имя Юрия Николаевича Денисюка, замечательного ученого, сохранится в истории физики в качестве одного из зачинателей нового направления. А среди всех, знавших его, сохранится в памяти его образ как отзывчивого, прекрасного человека, отдавшего всю жизнь науке.

Профессор, доктор физ.-мат.наук С.Б.Гуревич

МЕЧТЫ

Еще в школьные годы я мечтал уже работать в области теоретической физики, т.е. квантовой механики и теории относительности, которой в то время увлекалось много молодых людей. Однако действительность оказалась далекой от моих планов. После окончания Ленинградского института точной механики и оптики в 1954 г. и поступления на работу в Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова (Ленинград) получилось так, что мне пришлось заниматься очень скучной работой по разработке обычных оптических устройств, состоящих из линз и призм.

Одним из главных увлечений в те годы было чтение научно-фантастических рассказов. В числе таких рассказов я натолкнулся на рассказ известного советского писателя Ю. Ефремова "Звездные корабли". На меня произвел большое впечатление один из эпизодов этого рассказа: современные археологи, раскапывая место, где инопланетяне охотились на динозавров много миллионов лет тому назад, случайно находят странную пластинку. "Оба профессора невольно содрогнулись, когда удалили пыль с поверхности пластинки. Из глубокого совершенно прозрачного слоя, увеличенное неведомым оптическим ухищрением до своих естественных размеров, на них взглянуло странное лицо. Изображение было сделано трехмерным, а главное, невероятно живым, особенно это относилось к глазам".

ПЛАНЫ И ИДЕИ

У меня возникла дерзкая мысль: нельзя ли создать такую фотографию средствами современной оптики? Или, если быть более точным, нельзя ли создать фотографии, воспроизводящие полную иллюзию реальности зарегистрированных на них сцен?

Первые шаги в решении этой задачи были достаточно просты. Было очевидно, что полностью обмануть зрительный аппарат человека и создать у него иллюзию того, что он наблюдает истинный предмет, можно, если бы удалось воспроизвести волновое поле света, рассеянного этим объектом. Было также понятно, что задача воспроизведения волнового поля могла бы быть

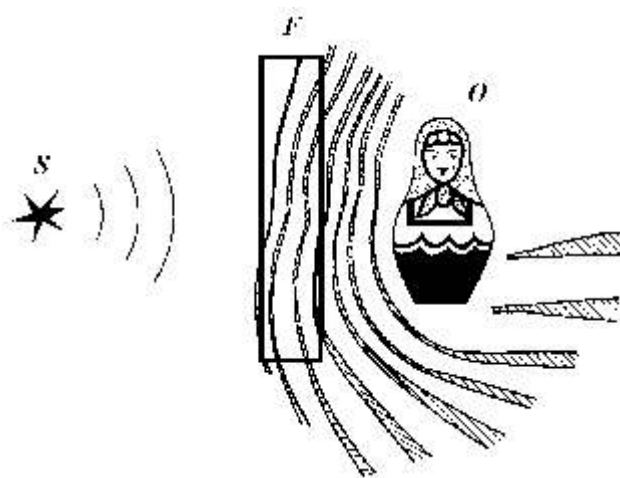


Рис.1. Конфигурация пространственной стоячей волны, возникающей вокруг объекта O , на который падает излучение монохроматического источника S . Регистрация голограммы с помощью референтной волны, распространяющейся в направлении, противоположном направлению объектной волны, заключается в том, что фотопластинка F размещается между источником S и объектом O — т.е. там, где структура стоячей волны сильно сжата. В этих условиях структура голограммы приобретает объемный характер.

решена, если бы удалось найти метод регистрации и воспроизведения распределения фаз этого поля.

Работа Д. Габора, в которой он излагал принципы голографии [1], была мне неизвестна, и в 1958 г. я начал самостоятельно решать эту проблему. Следуя приблизительно по тому же пути, что и Габор, я пришел к идее выявления фаз сложной объектной волны за счет ее смещения с референтной волной, обладающей достаточно простой формой. Исходя, так же как и Габор, из принципа Гюйгенса, я считал, что запись и воспроизведение волнового поля должны обязательно осуществляться на поверхности. Именно в этом пункте и возникла основная сложность в реализации моей идеи.

Действительно, в то время как Габор записывал голограмму на фотопластинке, расположенной за объектом, т.е. там, где объектная и референтная волны распространяются приблизительно в одном направлении, я предполагал подавать референтную волну навстречу объектной волне. Как показано на рис.1, это означает, что фотопластинка F должна располагаться в пространстве между источником излучения S и объектом O . В этой области возникающая интерференционная картина (стоячая волна) объектной и референтной волн имеет очень мелкую структуру. Действительно, расстояние между поверхностями пучностей стоячей волны равно половине длины световой волны или $0,25 \text{ мкм}$ в видимом диапазоне спектра. Для того, чтобы записать плоское сечение такой структуры, необходимо иметь фотопластинку с толщиной эмульсионного слоя порядка $0,1 \text{ мкм}$, тогда как у реальных фотопластинок она составляет $5-10 \text{ мкм}$. Трудность казалась мне непреодолимой, и я был близок к тому, чтобы прекратить работу в этом направлении.

Выход из тупика показала работа Г. Липпмана, который в конце 19 века показал, что фотография объемной картины плоской стоячей волны обладает свойством воспроизводить спектральный состав зарегистрированного на ней излучения [2]. Тогда у меня

возникло предположение, что может быть, не имеет смысла ограничиваться случаем записи на поверхности? Возможно, сложные изгибы поверхностей пучностей зарегистрированной в объеме стоячей волны содержат информацию не только о спектральном составе, но и о фазе волновых полей? Несколько вариантов теории и эксперимент подтвердили справедливость этого предположения [3-6]. Действительно, оказалось, что объемная фотографическая модель картины стоячей волны реально обладает воистину чудесными отображающими свойствами: она способна воспроизвести точные значения фазы, амплитуды и спектрального состава объектной волны. В то время, поскольку я не знал о методе Габора и введенном им термине "голография", я присвоил этой модели мой собственный термин "волновая фотография". Этот термин встречается в моих первых статьях в качестве обобщения понятия "голограмма" на третье измерение [7].

СХЕМА ЗАПИСИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕХМЕРНОЙ ГОЛОГРАММЫ

Если бы меня спросили, какое самое краткое описание результатов моих мыслей я хотел бы оставить на память моим потомкам, я бы ответил без раздумий. Конечно, рисунок схемы записи и реконструкции трехмерной голограммы понятен любому разумному существу.

На рис. 2а приведена схема записи трехмерной голограммы. Монохроматический свет источника S падает на произвольный объект O . Свет, рассеянный объектом (волна W_0) интерферирует с падающим светом (волна W_s), в результате чего возникает стоячая волна. Поверхности пучностей этой стоячей волны (места, в которых интенсивность света максимальна) обозначены d_1, d_2, d_3 . В поле стоячей волны помещен некоторый

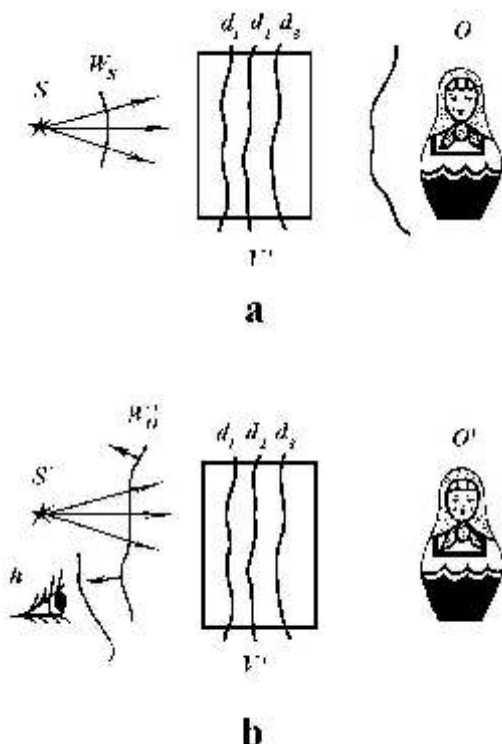


Рис. 2. Схема записи (верхний рисунок) и восстановления (нижний рисунок) трехмерной голограммы.

объем V' , заполненный прозрачным светочувствительным материалом. После экспозиции и последующей химической обработки в объеме V' возникает материальная модель стоячей волны, при этом каждая зарегистрированная голограммой поверхность пучностей превращается в своеобразное кривое зеркало.

Процесс реконструкции трехмерной голограммы показан на рис.2б. Сферическая волна от обычного источника белого света S' падает на голограмму V' . Каждое образовавшееся на месте поверхности пучностей сферическое зеркало, отражая эту волну, трансформирует ее в объектную волну W'_0 . Что же касается всей системы следующих друг за другом зеркальных поверхностей, то их роль сводится к воспроизведению спектрального состава света, зарегистрированного на голограмме. Это означает, что трехмерная голограмма выбирает из сплошного спектра и отражает назад только те монохроматические компоненты, которые были на ней зарегистрированы.

В результате всех этих процессов наблюдатель h , воспринимающий волны излучения, реконструированного голограммой, видит единственное цветное трехмерное изображение объекта, которое невозможно отличить от реального. В отличие от голограммы Габора, в этом случае отсутствуют искажения и ложное изображение и кроме того, нет ограничений размеров объекта.

ТРЕХМЕРНАЯ ГОЛОГРАММА: ЭТО МЕТОД ИЛИ ЯВЛЕНИЕ?

Когда стали открыты волшебные свойства трехмерной голограммы, возник следующий вопрос: является ли трехмерная голограмма новым методом изображения или новым явлением природы, т.е. новой научной истиной? Несмотря на то, что моей первоначальной целью являлось создание нового метода получения изображений, мне стало ясно, что в данном случае самым важным было новое, интересное физическое явление. Различие между терминами "метод" и "явление" является далеко не формальным. В то время как метод предоставляет только возможности, обеспечиваемые его изобретателем, явление существует в соответствии со своими собственными законами и иногда может оказаться значительно более широким, чем считалось первоначально.

Решив, что я имею дело с явлением, я дал ему довольно сложное название: "явление отображения оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения" [8]. Идею, лежащую в основе этого названия, можно изложить следующим образом. Можно сравнивать только те предметы, которые одинаковы и существуют в действительности. И материальный объект, и его материальная голограмма действительно существуют. Голограмма, когда ее помещают рядом с объектом, становится его оптическим эквивалентом (относительно излучения, с помощью которого она была записана). Эти два объекта связаны одним и тем же волновым полем; следовательно, оптические свойства объекта каким-то образом отражены в волновом поле излучения (light-wave field). В какой-то степени этот процесс подобен тому, который изображен в сцене из

"Ада" Данте: человек и змий, смотря друг на друга, преобразуются – человек в змия, а змий – в человека.

Обобщая известную мне к тому времени информацию о голограммах, я представил общее явление голографии в следующем виде (рис.3) [9]. Самая полная информация о волновом поле объекта содержится в бесконечной трехмерной картине стоячей волны, окружающей объект O . Все известные виды голограмм можно рассматривать как фрагменты этой картины. Способность этих фрагментов реконструировать волновые поля понижается при уменьшении размера фрагмента. В частности, ограниченный объем исходной картины сохраняет способность восстанавливать фазовый, амплитудный и спектральный состав объектной волны; однако, в данном случае точность реконструкции ограничена. Плоское сечение исходной картины не обладает способностью воспроизводить спектральный состав. Его способность воспроизводить фазы волнового поля также ограничена, что приводит к появлению сопряженного изображения. Дальнейшее уменьшение размера голограммы увеличивает размытие точек в восстановленном изображении объекта.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГОЛОГРАММЫ

Как правило, физическое явление может рассматриваться с различных точек зрения. В физике, совпадение результатов различных версий теории является одним из способов доказательства ее справедливости. К тому же, каждая версия теории обычно раскрывает свою индивидуальность, представляя определенные свойства изучаемого явления в очевидном наглядном виде. Я доказал существование данного явления, используя четыре различных варианта теории голографии, а именно, волновой, лучевой, операторный и Фурье-варианты [10]. Главным недостатком этих вариантов является то, что в них используется Борновское приближение, и таким образом они могут дать количественные результаты только в случае, если дифракционная эффективность голограммы достаточно мала. Однако это приближение достаточно хорошо предсказывает самые важные свойства трехмерной голограммы.

ПЕРВОНПЧАЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Первый вопрос, который возник при подготовке эксперимента, казался вполне простым: какой светочувствительный материал следует выбрать для записи трехмерной стоячей волны? Несмотря на то, что с тех пор прошло много времени, этот вопрос по-прежнему остается главным. Светочувствительные материалы сменяли друг друга: я работал с галоидно-серебряными пластинками, фотополимерами, смесями газов и жидкими кристаллами, тем не менее их роль в голографии остается определяющей.

Я был разочарован своим первым знакомством со светочувствительными материалами. Повторив методику изготовления сверхразрешающих пластинок, разработанную Г. Липпманом [11], а также методики, предложенные в работах Е. Валенты [12] и Х.Е. Айвса [13], я пришел к неутешительному результату, что чувствительность этих фотопластинок ничтожно мала. По всей вероятности, фотохимии начала XX века владе-

ли "ноу-хау", который они не опубликовали в своих статьях.

На мое счастье, я был хорошо знаком со специалистом в области фотохимии галоидно-серебряных пластинок, покойной Р.Р. Протас. Она вспомнила, что кто-то обнаружил, что погружение в раствор триэтанолamina может удвоить или утроить чувствительность готовых фотопластинок. Результат применения этого процесса к липпмановским фотопластинкам был весьма впечатляющим, так как чувствительность увеличилась в тысячу раз и стала вполне достаточной для проведения эксперимента. Несмотря на это, я пытался еще усовершенствовать эти фотопластинки: в общей сложности было проведено около 200 синтезов эмульсии. При этом варьировались концентрация серебра, спектральная область сенсibilизации, величина зерен галоидного серебра, а также толщина эмульсионного слоя [14].

Я начал проводить эксперименты по записи трехмерных голограмм в 1958 году. Поскольку в то время лазер еще не был изобретен, в качестве источника света я выбрал ртутную лампу высокого давления. Излучение этой лампы коллимировалось и с помощью фильтра из него выделялась составляющая с длиной волны $\lambda = 5460 \text{ \AA}$. Длина когерентности такого излучения составляла несколько десятков миллиметра и поэтому глубина рельефа объекта должна была быть ограничена до минимума. Это требование существенно ограничило выбор объектов. В результате я остановился на выпуклых зеркалах с большими радиусами кривизны (от 2×10^3 до 3×10^2 мм). Первые эксперименты по записи таких объектов были проведены в конце 1958 года и показали, что полученные трехмерные голограммы действительно являются оптическими эквивалентами выпуклых зеркал. Впервые я мог расслабиться: мои теоретические рассуждения имели практическое подтверждение.

До сих пор я сожалею о том, что мне не пришло в голову выбрать в качестве объекта рельеф монеты. Если бы я это сделал, я бы сразу достиг своей исходной цели, т.е. доказал бы возможность использования голографии для разработки изобразительной техники, которая могла бы создать иллюзию реального существования изображенных объектов. Моя ошибка еще раз доказывает, что в голографии выбор объекта является определяющим для достижения успеха как в научных разработках, так и в области искусства.

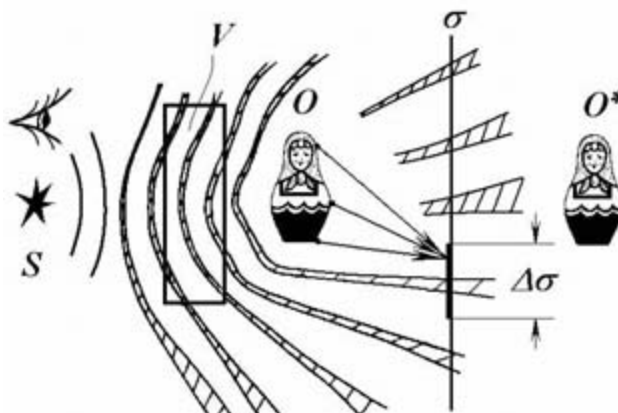


Рис. 3. Схема общего явления голографии.

РАЗОЧАРОВАНИЯ И БОРЬБА

Первым ударом судьбы явилось знакомство с работой Д. Габора [15]. По удивительному стечению обстоятельств именно в тот день, когда я собирался рассмотреть схему, похожую на схему Габора, я обнаружил на своем столе сборник докладов, привезенных моим коллегой, участвовавшим в конференции в Стокгольме. Просматривая этот сборник, я наткнулся на статью Г.М.А. Эль-Сама, идеи которой показались мне по-добрительно знакомыми. Найдя по ссылкам первоначальную статью Д. Габора, я был потрясен. Конечно, работа Д. Габора очень сильно отличалась от моей, а схема записи была менее полной. Однако приведенная в аннотации формулировка идеи не оставляла сомнений, что автор глубоко понимает роль референтной волны при записи фазы излучения. В результате мне пришлось внести несколько изменений в уже практически готовую статью и включить в нее, наряду со ссылкой на работу Г. Липпмана, также и ссылку на работу Д. Габора.

Нельзя сказать, что я с радостью обнаружил, что работа Габора была выполнена до меня. Однако тот факт, что я со своими мыслями не был одинок, был приятен. Гораздо более неприятными были события, последовавшие после моих попыток опубликовать свои результаты. Я внезапно обнаружил, что у меня, молодого научного сотрудника, имеется много могущественных противников, среди которых был академик, член-корреспондент Академии наук и несколько докторов наук. К счастью, у меня были и сторонники. Больше всего мне помог академик В.П. Линник, который рекомендовал мою статью к публикации в журнале "Доклады Академии наук СССР" [16], что имело для меня решающее значение. Публикация других статей [17], которые были посланы одновременно с первой статьей, существенно затянулась. Когда последняя из этих статей была опубликована в 1965 году, редакция намеренно изменила дату ее поступления.

Мое положение улучшилось, когда голография стала известной в результате опубликования статьи Е.Н. Лейта и Ю. Упатниекса по записи трехмерного изображения шахматной доски [18]. Последовавший за этим научный бум в области голографии способствовал тому, что в 1970 году мне была присуждена высшая научная награда СССР – Ленинская премия.

В том же 1970 году я был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. Существенную роль в этом избрании сыграло то обстоятельство, что Президент Академии наук СССР М.В.Келдыш получил хорошие отзывы о моей работе во время своего визита в США.

Борьба с консервативными коллегами и последовавший за этим мой триумф плохо повлияли на мои исследования в области голографии. В течение этих долгих лет меня осаждали журналисты и многочисленные новички, которые желали приобщиться к голографии. Это были не лучшие годы в моей жизни.

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СССР

Рассказ о дальнейшем развитии голографии в СССР будет непонятен без описания принципов организации научных исследований в стране. В отличие от многих

других стран, в СССР существует Академия наук – особое государственное учреждение, призванное осуществлять руководство научными исследованиями. Академия наук объединяет систему специальных исследовательских институтов, каждый из которых, как правило, занимается решением разнообразных задач. Кроме того, в Академии существует система Научных советов, объединяющих специалистов из различных институтов, которые работают в одной области исследований.

Вообще говоря, эффективность работы Академии наук не велика; однако, по моему мнению, это не связано с принципами, лежащими в ее основе. Академия наук СССР предоставляет определенные возможности тем, кто хочет и может развивать науку.

Научный совет по проблеме "Голография" отвечает за все исследования в области голографии. Это учреждение не имеет финансирования. В его задачи входит организация конференций и семинаров, а также заседаний для обсуждения перспектив в развитии той или иной проблемы. Как правило, на таких совещаниях присутствовали специалисты в области голографии, обработки информации и химии, работающие как в системе Академии наук, так и в отраслевых институтах. Обычно наша работа на заседаниях состояла в следующем. Мы с энтузиазмом обсуждали, например, какими свойствами должны обладать фотопластинки, предназначенные для изобразительной голографии, или рассматривали новое явление передачи энергии динамической голограммой и что следует предпринять для их дальнейшего развития. Затем мы осознавали, что у нас нет ни финансовых, ни административных ресурсов для немедленной реализации наших идей – и мы расходились в большом разочаровании.

Теперь очевидно, что наши совещания и дискуссии были не напрасны. В результате наших обсуждений требований, предъявляемых к светочувствительным средам, фотохимии заинтересовались этим вопросом и организовали производство фотопластинок, пригодных для использования в голографии. Обсуждение новых явлений в значительной степени стимулировало интерес ученых к работе в новых научных областях. Таким образом получили развитие так называемые "динамическая голография" и "поляризационная голография".

ИЗОБРАЗИТЕЛЬНАЯ ГОЛОГРАФИЯ И ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Возможность демонстрировать изобразительные голограммы значительно облегчает работу голографиста, даже если он занимается разработкой оптических приборов. В моей лаборатории также приходилось выставлять изобразительные голограммы в поисках финансовой поддержки. Сначала мы пытались показывать голограммы, записанные по методу Лейта и Упатниекса. Однако вскоре стало очевидным, что это хлопотно и дорого. Каждая голограмма должна была быть снабжена лазером, и эти лазеры нужно было доставлять на выставку и обслуживать их в течение всего времени работы. Эксперименты по записи изобразительных отражательных трехмерных голограмм также проводились в нашей лаборатории; однако, из-за недостатка воображения на этих голограммах по традиции

регистровались монеты, медали и другие объекты с малой глубиной. Первая крупноформатная отражательная трехмерная голограмма с изображением мраморной статуэтки была получена покойным Г.А. Соболевым в 1967 году в Кино-фото институте в Москве. После этого начались интенсивные исследования по созданию липпмановских фотопластинок, необходимых для записи таких голограмм.

Один тип липпмановских фотопластинок, ЛОИ-2, был разработан в Оптическом институте им. С.И. Вавилова Р.Р. Протас, которая продолжила начатые нами ранее совместные исследования по разработке фотопластинок, пригодных для записи трехмерных голограмм. Чувствительность этих фотопластинок равна $0,5 \times 10^3$ Дж/см², а дифракционная эффективность достигает значения 50%. Другой тип липпмановских фотопластинок, ПЭ-2, был разработан в Москве Н.И. Кирилловым, который работал вместе с голографистом Г.А. Соболевым [19]. Чувствительность этих фотопластинок на порядок выше, чем у ЛОИ-2, при такой же или даже более высокой дифракционной эффективности. В основном голографисты предпочитают использовать фотопластинки ПЭ-2, хотя их параметры менее стабильны, чем у ЛОИ-2.

Используя фотопластинки, разработанные описанным способом, несколько групп голографистов из Ленинграда, Москвы, Киева и Тбилиси создали потрясающие отражательные крупноформатные голограммы, которые широко выставлялись на различных выставках. Многие годы эти голограммы занимали лидирующие позиции в своей области.

В 1968 году наша лаборатория начала разрабатывать технику записи объемных голографических портретов людей [20]. На начальных этапах исследования регистрация осуществлялась с помощью рубинового лазера. Однако неудобства, связанные с необходимостью подкрашивать губы клиента синей помадой, что неизбежно при регистрации в красном свете, а также трудности получения высококачественных кристаллов рубина, вынудили нас перейти на съемку портретов в зеленых лучах неодимового лазера с удвоением частоты ($\lambda = 5300 \text{ \AA}$).

В этом случае исходная голограмма регистрируется по схеме Э. Лейта и Ю. Упатниекса излучением неодимового импульсного лазера и затем она копируется во встречных пучках с тем, чтобы окончательный портрет можно было бы восстанавливать с помощью обычного источника белого света [21]. Подобным способом было получено много высококачественных портретов. К сожалению, этим портретам не хватает той особенной живости, которая была присуща портретам, описанным писателем-фантастом Ю. Ефремовым. Эксперименты, проведенные за последние несколько лет, показали, что переход к изготовлению цветных портретов может значительно улучшить впечатление, производимое этими призрачными образами людей.

Кроме изучения общих свойств трехмерных голограмм и работы над развитием трехмерных изобразительных голограмм, мои коллеги и я провели ряд исследований другого рода. Среди этих исследований стоит упомянуть развитие метода получения голографического портрета функции пространственной когерентности

света. Такой портрет визуализирует четырехмерную функцию, используя две пространственные координаты восстановленного изображения и две пространственные координаты точки на голограмме, через которую осуществляется наблюдение [22].

Подобный подход используется для регистрации картины временной когерентности света. Здесь голограмма восстанавливает картину волнового цуга излучения, испускаемого лазером. При изменении точки голограммы, через которую осуществляется наблюдение, восстановленное изображение цуга волны сдвигается вдоль по траектории и воспроизводит картину пространственного поля этого волнового цуга [23, 24].

Среди других исследований можно было бы упомянуть развитие метода записи голограмм некогерентных объектов стробированием бегущих волн интерференции [25, 26]. Эти методы могут использоваться для получения изображений удаленных небесных тел.

В 1988 году я сменил место работы и теперь я работаю в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе АН СССР. В этом институте проводятся исследования в области физики твердого тела, физики полупроводников и микроэлектроники. Эта смена места работы совпала с повышением общего интереса к применению оптики в вычислительной технике. В результате этих событий я заинтересовался изучением возможностей применения голографии в оптических вычислениях.

Наиболее общий подход к этой проблеме включает в себя идею, что интеллект не является складом истин, а представляет собой универсальную систему связей и сравнений различных объектов и событий. С этой точки зрения, провода, по которым распространяются электрические сигналы, каким бы странным это не казалось, являются главными интеллектуальными устройствами электронного компьютера.

Голография предлагает другой тип межсвязей. В данном случае сигналы передаются путем распространения наложенных волн в пространстве, причем связь между волнами устанавливается с помощью решеток, которые также наложены друг на друга. Глубокая голограмма является самым совершенным элементом связи различных волн, так как составляющие ее трехмерные решетки однозначно связывают определенные пары волн и не реагируют на другие волны. Однако применение таких голограмм связано с большими трудностями из-за необходимости изготавливать светочувствительные материалы большой толщины (порядка нескольких миллиметров и более).

Чтобы избежать проблем, связанных с записью сверхглубоких голограмм, нами предложен метод так называемых псевдоглубоких голограмм, в соответствии с которым голограмма записывается на обычном тонкослойном светочувствительном материале, а трехмерный эффект достигается путем ограничения записи одномерными страницами информации [27, 28]. На рис. 4 представлена схема записи псевдоглубоких голограмм. Светочувствительный слой H , на котором записан веер лучей, распространяющихся от линейного объекта ab , расположен под малым углом β относительно плоскости распространения этих пучков. Щель D устанавливается за голограммой. При реконструкции эта щель выбирает пучки, лежащие в объектной плоскости, и удаляет все остальные пучки. В общем,

это является особой комбинацией оптического устройства и голограммы.

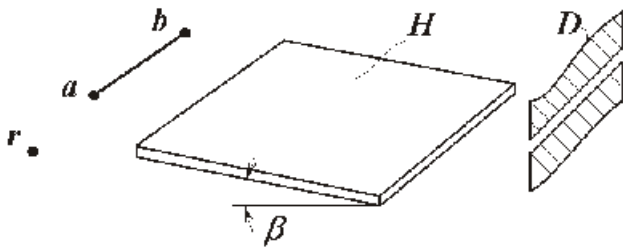


Рис.4. Схема записи и восстановления псевдоглубокой наклонной голограммы. H - двумерная тонкая голограмма; β - угол наклона голограммы к оптической оси системы; ab - линейный объект; r - референтный источник; D - щель, которая выбирает пучки, лежащие в объектной плоскости, из набора пучков восстановленного света.

Мы использовали этот метод для совершения некоторых операций, характерных для глубоких трехмерных голограмм, в частности, мы выполнили ассоциативное считывание, при котором часть объекта восстанавливала все изображение, записанное на голограмме [29]. Мы также осуществили мультиплексирование голограмм на один и тот же участок фотоматериала [30] и выполнили эксперименты, включающие восстановление объектной волны с помощью точечного референтного источника [31]. В будущем мы надеемся применить метод псевдоглубоких голограмм не только для обработки информации, а также для записи и проекции трехмерных изображений в кино и телевидении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В общем, число точек зрения на один и тот же вопрос равно числу людей, живущих на этой планете. По моему мнению, голография прежде всего является важным физическим явлением, которое уже заявило и доказало свою явную склонность и способность точно воспроизводить различные волновые поля. Так как каждая материальная частица нашего мира сопровождается волной, можно предположить, что голографические явления лежат в самой основе структуры мира.

Перспективы технического применения голографии определяются в основном успешным развитием различных светочувствительных сред. В частности, возможности применения голографии в вычислительных технологиях в таких областях, как создание устройств ассоциативной памяти и межсвязей с быстрым переключением зависит от возможностей развития высокочувствительных обратимых светочувствительных сред, которые могут работать со скоростью порядка 10^{12} сек. Достижения современной физики в таких областях, как квантовые ямы, сверхрешетки и спектрально-селективные среды позволяют надеяться на быстрый прогресс в развитии таких светочувствительных сред.

В ближайшем будущем отражательные трехмерные голограммы должны обеспечить значительный рост чувствительности и эффективности липпмановских фотопластинок и фотополлимерных систем, что откроет дорогу для развития очень крупноформатных цветных го-

лограмм, которые будут украшать интерьеры зданий и будут широко использоваться как копии экспонатов музеев.

Развитие голографического кинематографа и телевидения остается главной задачей в голографии, которая будет решена, благодаря широкому применению компьютеров и оптоэлектроники. Основы современной голографии и квантовой электроники позволяют создать необычные фотографии 'живых' движущихся объемных изображений, которые будут воспроизводить короткие сцены реальной жизни в соответствии с программой, закодированной в молекулярной структуре светочувствительной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Gabor. Microscopy by Reconstructed Wave Front. Proc. Roy. Soc. A **197**, 454 (1949).
2. G. Lippmann. Photographie des Couleurs. Journal de Physique **3**, 97(1894)
3. Ю.Н.Денисюк. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. Доклады Академии наук СССР **144**, 1275 (1962).
4. Ю.Н.Денисюк. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. Оптика и спектроскопия **15**, 523 (1962).
5. Ю.Н.Денисюк. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. Оптика и спектроскопия **18**, 275 (1965).
6. Ю.Н.Денисюк. К вопросу о фотографии, воспроизводящей полную иллюзию действительности изображаемого объекта. ЖНиПФиК **11**, 46 (1966).
7. См. Денисюк, [3-6].
8. Я использовал этот заголовок в своих первых трех статьях, см. Денисюк [3-5].
9. Ю.Н.Денисюк. Голография и работы ГОИ по ее развитию. Опτικο-механическая промышленность **11**, 18 (1967).
10. Волновой и лучевой варианты теории трехмерной голографии рассмотрены в статье Денисюка [4], операторный вариант - в [3,5], Фурье-вариант - в [5].
11. Липпман [2].
12. E. Valenta. Die Photographie in naturlichen Farben (Halle, Germany, 1912).
13. H. E. Ives. An Experimental Study of the Lippmann Color Photograph, Astrophysical Journal **27**, 323 (1908).
14. Ю.Н.Денисюк, Р.Р.Протас. Усовершенствованные липпмановские фотографические пластинки для регистрации стоячих световых волн. Оптика и спектроскопия **14** (1963), 721-725.
15. Gabor [1].
16. Денисюк [3].
17. Денисюк [4, 5].
18. E.N. Leith, J.Upatnieks. Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects. Journal Opt. Soc. Amer. **54**, 1295 (1964).
19. Ю.Н.Денисюк. Художественная голография с записью в трехмерных средах на основе Липпмановских эмульсий. ЖТФ **48**, 1683 (1978).
20. Д.И.Стаселько, В.Г.Смирнов, Ю.Н.Денисюк. О получении голограмм живого диффузного объекта с

помощью одномодового рубинового лазера. ЖНиП-Фик **13**, 135 (1968).

21. Е.Ф.Артемов, В.Г.Беспалов, В.З.Брыскин, Н.Д.Варзобова, М.М.Ермолаев, Д.И.Стаселько. Техника получения монохромных голографических портретов, восстанавливаемых в белом свете. В сб.: "Оптическая голография" (Оптические применения), Ленинград, Наука (1985). С.107.

22. Д.И.Стаселько, Ю.Н.Денисюк. О влиянии структуры поперечных мод источника излучения на изображение, создаваемое голограммой. Оптика и спектроскопия, **28**, 323 (1970).

23. Д.И.Стаселько, Ю.Н.Денисюк, А.Г.Смирнов. О голографической регистрации картины временной когерентности цуга волн импульсного источника излучения. Оптика и спектроскопия **26**, 413 (1969).

24. Yu.N.Denisyuk, D.I.Staselko, R.R.Herke. On the Effect of Time and Spatial Coherence of Radiation Source on the Image Produced by a Hologram. Nouvelle Revue d'Optique Appliquee **2**, 3 (1970).

25. Ю.Н.Денисюк, Д.И.Стаселько. О возможности получения голограмм с использованием референтного луча, длина волны которого отличается от длины волны излучения, рассеянного объектом. Доклады Академии наук СССР **176**, 1274 (1967).

26. И.Н.Давыдова, Ю.Н.Денисюк. О голографии интенсивностей. Оптика и спектроскопия **26**, 408 (1969).

27. Ю.Н.Денисюк. Псевдоглубокая голограмма. Письма в ЖТФ **15**, 84 (1989).

28. Ю.Н.Денисюк. Псевдоглубокая голограмма и ее свойства. ЖТФ **60**, 59 (1990).

29. Ю.Н.Денисюк, Н.М.Ганжерли, Безопорная ассоциативная псевдоглубокая голограмма, Письма в ЖТФ **15**, No. 14, 4 (1989).

30. Ю.Н.Денисюк, Н.М.Ганжерли, Псевдоглубокая голограмма с многократной записью, Письма в ЖТФ **15**, No. 15, 14 (1989).

31. Ю.Н.Денисюк, Н.М.Ганжерли, Особенности ассоциативного опознавания объектов, зарегистрированных на псевдоглубокой голограмме, Письма в ЖТФ **16**, No. 6, 79 (1990).