

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Санкт-Петербургский Государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики

НПК "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова"

Всероссийский семинар  
**«Юрий Николаевич Денисюк —  
основоположник  
отечественной голографии»**

Санкт-Петербург, 22–24 мая 2007 г.

**СБОРНИК ТРУДОВ**

Санкт-Петербург  
2007

ББК 22.343.4  
УДК 621.373.826

В настоящем сборнике, посвященном 80-летию Ю.Н. Денисюка, публикуются как материалы, посвященные его деятельности, так и работы, выполненные в русле его научных интересов.

ISBN

© ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН  
© СПбГУ ИТМО  
© НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова"

## Предисловие

*Настоящий сборник посвящен 80-летию со дня рождения выдающегося физика России – академика Юрия Николаевича Денисюка, которое отмечается в 2007 году, через год после его кончины.*

*Юрий Николаевич Денисюк не только является первым отечественным ученым в большой последовательности исследователей, посвятивших себя новому направлению в оптике, возникшему в середине XX века – голографии, но является и одним из признанных во всем мире основоположников этого направления. Следует отметить, что практически весь огромный объем исследований, составивший основу многих разделов голографии, проделан им в Ленинграде – С.-Петербурге. Важную роль в его научных достижениях сыграли ЛИТМО, который он окончил в 1954 году и который дал ему необходимые знания, и Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, в котором имелись все условия для проведения исследований и открытия им возможности объемной записи голограмм. Проведенные им экспериментальные работы по подтверждению предположения, что объемная фотография сложной картины стоячих волн, возникших при отражении света от произвольного объекта, воспроизводит не только спектральный состав излучения, на что указывал французский физик Липпман, но и амплитуду и фазу волны, требовали не только огромных усилий экспериментатора, но и высокой техники приготовления липпмановских фотографических пластинок с достаточно высокой чувствительностью и высокой разрешающей способностью. Сочетание виртуозности Ю.Н. Денисюка, как экспериментатора, с накопленным в ГОИ огромным опытом по изготовлению фотографических эмульсий привело к успеху. Ю.Н. Денисюк показал, что объемная фотография картины стоячих волн с высокой полнотой воспроизводит зарегистрированное ею волновое поле. Публикация полученных результатов в 1962 году была замечена во всем мире, и впоследствии ни у кого не возникло сомнения в приоритете Ю.Н. Денисюка. Уже в этой работе он проявил себя исследователем высокого класса, и большая серия его последующих работ только подтвердила эту высокую оценку, данную ему отечественной и зарубежной научной общественностью.*

*Работая с 1988 г. в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (и оставаясь по совместительству руководителем работ в ГОИ), Юрий Николаевич в более трудных условиях, которые возникли в это время, продемонстрировал те же высокие качества. Им, в сотрудничестве с его помощниками, опубликовано большое количество работ, сделано много докладов на международных конференциях. Его влияние на направления как отечественных, так и зарубежных исследований по голографии оставалось весьма значительным.*

*Необходимо отметить, что то здание голографии, в строительстве которого заложен труд Ю.Н. Денисюка, не следует считать достроенным. Появление в литературе множества публикаций по разработке новых объемных сред для записи голограмм позволяет надеяться, что объемная запись голограмм будет в дальнейшем хорошей основой для многих практических применений.*

*В настоящем сборнике, посвященном 80-летию Ю.Н. Денисюка, публикуются как материалы, посвященные его деятельности, так и работы, выполненные в русле его научных интересов.*

С.Б. Гуревич



Выдающийся российский ученый академик Юрий Николаевич Денисюк является признанным мировой наукой лидером и одним из пионеров нового направления в оптике – голографии.

Памяти Юрия Николаевича Денисюка посвящен Всероссийский семинар, собравший его коллег, учеников и сподвижников, в трудах которых продолжают и развиваются научные идеи, разработанные Юрием Николаевичем.

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 г., 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 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 способство-

вал 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 (DeMontfort) (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 переключившись 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 аккуратно 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 Науч-

ного 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*

## МОЙ ПУТЬ В ГОЛОГРАФИИ\*

Ю. Н. ДЕНИСЮК

### 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 решена, если бы уда-

лось 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 из-

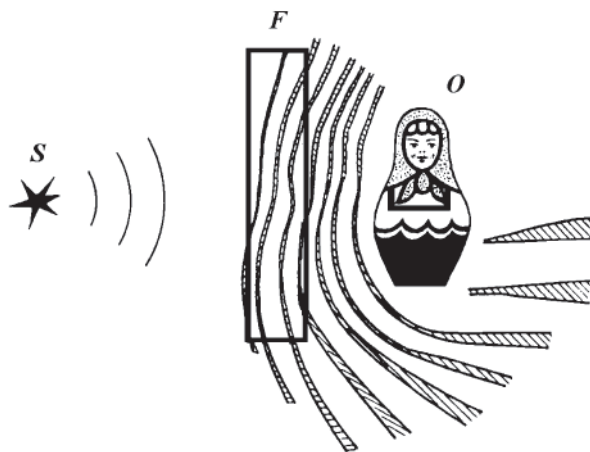


Рис. 1. Конфигурация пространственной стоячей волны, возникающей вокруг объекта  $O$ , на который падает излучение монохроматического источника  $S$ . Регистрация голограммы с помощью референтной волны, распространяющейся в направлении, противоположном направлению объектной волны, заключается в том, 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.

\* Статья “My way in holography” опубликована в журнале *Leonardo*, 1992. V. 25. № 5. PP. 425–430 (Pergamon Press).

лучения  $S$  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  $5\text{--}10 \text{ мкм}$ . 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

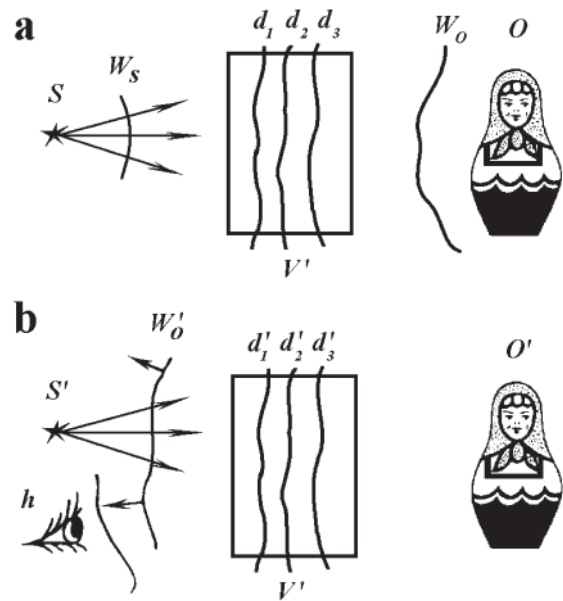


Рис. 2. Схема записи (верхний рисунок) и восстановления (нижний рисунок) трехмерной голограммы.

света максимальна) обозначены  $d_1, d_2, d_3$ . В поле стоячей волны помещен некоторый 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. 2b. 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.

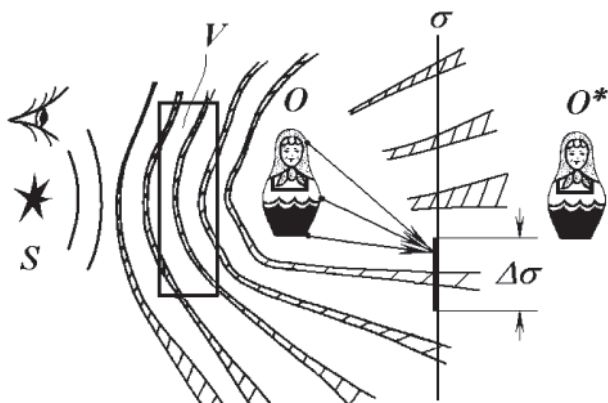


Рис. 3. Схема общего явления голографии.

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.

### Первоначальные 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 владели “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 миллиметров 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  $2 \times 10^3$  до  $3 \times 10^2$  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 пришлось 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 исполь-

зования 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.

### 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 подозрительно 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 при-

суждена 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 ресур-

сов 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 регистрировались 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/см<sup>2</sup>, 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 основ-

ном 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 полета 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.

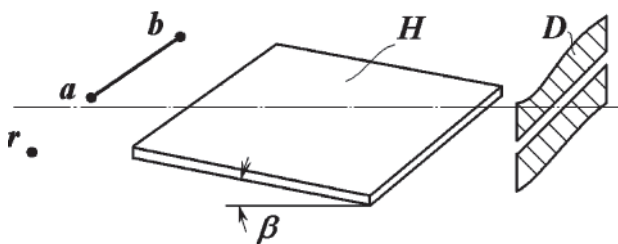
Наиболее общий подход к этой проблеме включает в себя идею, что интеллект не является складом истин, а представляет собой универсальную систему связей и сравнений различных объектов и событий. С этой точки зрения, провода, по которым распространяются электрические сигналы, каким бы странным это не казалось, 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  $\beta$  относительно плоскости распространения





**Рис. 4.** Схема записи и восстановления псевдоглубокой наклонной голограммы.

$H$  – двумерная тонкая голограмма;  $\beta$  – 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.

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.

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 меж-

связей 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 фотополимерных систем, что откроет дорогу для развития очень крупноформатных цветных голограмм, 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.

Автор хочет выразить свою благодарность Р.Р. Протас за регулярную помощь в исследовании липпмановских фотографических пластинок, Н.М. Гопштейн – за консультации по теории Максвелла, А.Е. Елькину, В.П. Линнику, Л.А. Арцимовичу и М.В. Келдышу за их своевременную оценку моих первых работ по голографии и В. Ронгонен – за помощь в экспериментах на липпмановских эмульсиях. Специальная благодарность – моей коллеге Лидии М. Александровой, которая переводила все мои статьи на английский язык.

### Литература и замечания

1. Gabor D. Microscopy by Reconstructed Wave Front, Proc. Roy. Soc., V. A 197 (1949), 454–463.
2. Lippmann G. Photographie des Couleurs, Journal de Physique 3 (1894), 97–106.
3. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения, Доклады Академии наук СССР, 144. № 6, 1275–1278 (1962).
4. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения, Оптика и спектроскопия, 15, 523–532 (1962).
5. Денисюк Ю.Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения 18. № 2, 275–283 (1965).

6. Денисюк Ю.Н. К вопросу о фотографии, воспроизводящей полную иллюзию действительности изображаемого объекта, ЖНиПФик, 11 (1966), 46–56.
7. См. Денисюк [3–6].
8. Я использовал этот заголовок в своих первых трех статьях, см. Денисюк [3–5].
9. Денисюк Ю.Н. Голография и работы ГОИ по ее развитию, Оптико-механическая промышленность. № 11 (1967), 18–25.
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. Valenta E. Die Photographie in natuerlichen Farben (Halle, Germany: 1912).
13. Ives H.E. “An Experimental Study of the Lippmann Color Photograph”, Astrophysical Journal 27 (1908), 323–332.
14. Денисюк Ю.Н., Протас Р.Р. 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. Leith E.N. and Upatnieks J. Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects, Journal Opt. Soc. Amer. 54. № 11, 1295–1299 (1964).
19. Денисюк Ю.Н. Художественная голография с записью в трехмерных средах на основе Липпмановских эмульсий, ЖТФ, 48. № 8, 1683–1687 (1978).
20. Стаселько Д.И., Смирнов В.Г., Денисюк Ю.Н. О получении голограмм живого диффузного объекта с помощью одномодового рубинового лазера, ЖНиПФик, 13, № 2. 135–136 (1968).
21. Артемьев Е.Ф., Беспалов В.Г., Брыскин В.З., Варзובה Н.Д., Ермолаев М.М., Стаселько Д.И. Техника получения монохромных голографических портретов, восстанавливаемых в белом свете, в сб. “Оптическая голография” (Оптические применения), Ленинград, “Наука”, 1985, с. 107–116.
22. Стаселько Д.И., Денисюк Ю.Н. О влиянии структуры поперечных мод источника излучения на изображение, создаваемое голограммой, Оптика и спектроскопия, 28, № 2, 323–330 (1970).
23. Стаселько Д.И., Денисюк Ю.Н., Смирнов А.Г. О голографической регистрации картины временной когерентности цуга волн импульсного источника излучения, Оптика и спектроскопия, 26, № 3, 413–420 (1969).
24. Denisjuk Yu.N., Staselko D.I. and Herke R.R. On the Effect of Time and Spatial Coherence of Radiation Source on the Image Produced by a Hologram”, Nouvelle Revue d’Optique Appliquee, 2 (1970), 3.
25. Денисюк Ю.Н., Стаселько Д.И. О возможности получения голограмм с использованием референтного луча, длина волны которого отличается от длины волны излучения, рассеянного объектом, Доклады Академии наук СССР, 176, № 6, 1274–1275 (1967).
26. Давыдова И.Н., Денисюк Ю.Н. О голографии интенсивностей, Оптика и спектроскопия, 26, № 3, 408–412 (1969).
27. Денисюк Ю.Н. Псевдоглубокая голограмма, Письма в ЖТФ, 15, № 8, 84–89 (1989).
28. Денисюк Ю.Н. Псевдоглубокая голограмма и ее свойства, ЖТФ, 60, № 6, 59–66 (1990).
29. Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. Безопорная ассоциативная псевдоглубокая голограмма, Письма в ЖТФ 15, № 14, 4 (1989).
30. Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. Псевдоглубокая голограмма с многократной записью, Письма в ЖТФ 15, № 15, 14 (1989).
31. Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. Особенности ассоциативного опознавания объектов, зарегистрированных на псевдоглубокой голограмме, Письма в ЖТФ 16, № 6, 79 (1990).

## СВОЙСТВА ГОЛОГРАММ, ЗАПИСАННЫХ В МАТЕРИАЛЕ С КВАДРАТИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ\*

Ю. Н. ДЕНИСЮК

Рассмотрены свойства голограммы, записанной в среде, обладающей квадратичной нелинейностью, для случаев, когда частоты объектной и опорной волн одинаковы и различны. Теоретически и экспериментально показано, что голограммы такого типа могут формировать трехмерные изображения объектов. Эксперименты по записи голограмм были выполнены с использованием Nd:YAG импульсного лазера с длительностью импульса 20 нс. Голограммы записывались в кристаллах ВВО и КТР.

### 1. Введение

Открытие голографии привело к возникновению новой плодотворной области оптики [1]. В самом общем виде голограмма представляет собой материальную модель картины интерференции объектной волны с плоской или сферической референтными волнами. Одно из наиболее важных свойств этой модели заключается в способности голограммы восстанавливать объектную волну при освещении ее референтной волной. Используя это свойство, возможно восстанавливать трехмерные изображения различных объектов. Однако получение трехмерных изображений оказывается не единственным применением голографии: коррекция искажений формы волновых фронтов и многие другие методы также относятся к тем областям, где можно с успехом применять голографию.

### 2. Постановка задачи

Некоторые из применений голографии могут быть реализованы только в случае, если время отклика голограммы равно длительности импульса современного импульсного лазера ( $10^{-12}$ – $10^{-15}$  с). Главное препятствие в реализации такого быстрого действия голограмм связано с тем, что скорость изменений структуры используемого материала мала. Один из способов увеличения скорости светочувствительного материала - это запись голограммы в материале с квадратичной нелинейностью, когда картина интерференции объектной и референтной волн записывается в виде распределения дипольных моментов, индуцированных в нелинейном материале. Этот процесс является очень быстрым, так как мобильность электронов, определяющая нелинейность второго рода, очень высока [2].

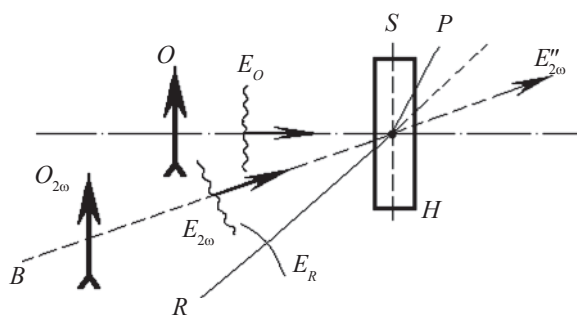
\* Статья "Свойства голограмм, записанных в материале с квадратичной нелинейностью" опубликована в журнале "Оптический журнал", 2007. Т. 73. № 7. С. 5–8.

Рассмотрим два случая процесса записи голограмм в материале с квадратичной нелинейностью. В случае так называемых голограмм с генерацией второй гармоники (ГВГ голограмма [3]) частоты объектной и референтной волн одинаковы; в другом случае частоты интерферирующих волн различны.

#### 2.1. Голограмма с генерацией второй гармоники

На рис. 1 представлена схема ГВГ-голограммы. В этом случае картина интерференции объектной волны  $E_O$  с референтной волной  $E_R$  записывается в нелинейном материале  $H$ , обладающем нелинейностью второго порядка. В результате голограмма генерирует восстановленную волну  $E_{2\omega}$ , которая формирует восстановленное изображение объекта  $O_{2\omega}$ .

Сначала создается впечатление, что ГВГ-голограмма представляет собой разновидность хорошо известной внеосевой голограммы, однако это не так: в действительности в этом случае частота восстановленной объектной волны  $E_{2\omega}$  удваивается и



**Рис. 1.** Общая схема записи и восстановления ГВГ-голограммы.  $H$  – светочувствительный нелинейный материал;  $O$  – объект;  $E_O$  – волна света, рассеянного объектом  $O$ ;  $R$  – референтный источник;  $E_{2\omega}$  – объектная волна, восстановленная голограммой;  $O_{2\omega}$  – восстановленное изображение объекта;  $S$  – произвольное плоское сечение внутри объема ГВГ-голограммы.

равняется  $2\omega$ , а не первоначальному значению  $\omega$ . Еще одной отличительной чертой ГВГ-голограммы является то, что восстановленное изображение  $O_{2\omega}$  располагается на биссектрисе угла  $OB$  между объектной  $E_O$  и референтной  $E_R$  волнами и сдвинуто в продольном направлении от голограммы  $H$ .

Рассмотрим основные элементы теории ГВГ-голограммы. Напряженности электрических полей объектной  $E_O$  и референтной  $E_R$  волн в плоскости  $S$  голограммы  $H$  можно записать в следующем виде:

$$E_O = A_O(r) \exp\{i[k_1 L_O(r) + \omega t]\}, \quad (1)$$

$$E_R = A_R \exp\{i[k_1 L_R(r) + \omega t]\}, \quad (2)$$

где  $A_O$  – амплитуда сложной объектной волны, которая зависит от пространственной координаты  $r$ ;  $A_R$  – амплитуда референтной волны – простой сферической волны, амплитуда которой практически не зависит от координаты  $r$ ;  $L_O(r)$  и  $L_R(r)$  – эйконалы объектной и референтной волн, которые определяют формы их волновых фронтов. Эйконалы представляют собой функции распределения оптических путей пучков от объекта  $O$  и источника  $R$  до плоскости  $S$ . Результирующее электрическое поле  $E_\omega$  в плоскости  $S$  будет равно сумме  $E_O$  и  $E_R$ , т. е.

$$E_\omega = A_O(r) \exp\{i[k_1 L_O(r) + \omega t]\} + A_R \exp\{i[k_1 L_R(r) + \omega t]\}, \quad (3)$$

Нелинейный материал  $H$ , освещаемый волной  $E_\omega$ , генерирует вторичную волну на частоте  $2\omega$ . В соответствии с законами нелинейной оптики, волна, генерируемая в среде с квадратичной нелинейной поляризуемостью  $\chi^2$ , определяется следующим выражением [2]:

$$E_{2\omega} = m E_\omega E_\omega, \quad (4)$$

где  $m$  – постоянная,  $E_\omega$  – первоначальное электрическое поле, взаимодействующее со средой,  $E_{2\omega}$  – вторичное волновое поле, генерируемое нелинейным материалом. Электрическое поле  $E_{2\omega}$ , генерируемое ГВГ-голограммой, можно найти, если подставить значение  $E_\omega$  из уравнения (3) в уравнение (4).

В результате мы получаем три члена, однако только один из них, включающий амплитуды  $A_O$  и  $A_R$  и фазы  $L_O$  и  $L_R$ , описывает волну, восстановленную голограммой:

$$E_H = 2A_O A_R \exp\left\{i\left[\frac{k_O L_O(r) + L_R(r)}{2} + 2\omega t\right]\right\}, \quad (5)$$

где  $k_O = 2k_1$ .

Из выражения (5) следует, что частота волнового поля света, формирующего восстановленное изображение, удваивается. Само изображение сдвинуто

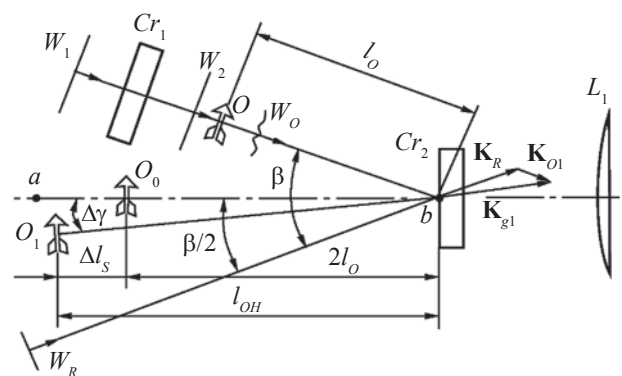
в соответствии с изменениями эйконала объекта. В частности, эйконал  $L_O(r)$  объектной волны преобразуется в эйконал  $L_O(r)/2$  восстановленной волны объекта. Такое изменение эйконала означает, что восстановленное изображение сдвинуто от голограммы вдоль биссектрисы  $BP$  (см. рис. 1).

Эйконал  $L_R(r)$  референтной волны преобразуется в значение  $L_R(r)/2$ . Это означает, что восстановленное изображение  $O_{2\omega}$  изменяет свое положение из первоначального  $O$  в положение  $O_{2\omega}$ , которое находится на биссектрисе  $BP$ .

## 2.2. Динамическая голограмма

Успехи при получении ГВГ-голограмм стимулировали нас к тому, чтобы записать динамическую голограмму в случае, когда частоты объектной и референтной волн различны. Было очевидно, что в отличие от случая ГВГ-голограммы в этом случае частота восстановленной объектной волны может отличаться от частоты второй гармоники. Голограмму такого типа мы называем “ $\chi^2$ -динамической голограммой” [4].

В общих чертах схема записи  $\chi^2$ -голограммы аналогична схеме записи ГВГ-голограммы (см. рис. 1). Основное различие между этими двумя типами голограмм состоит в том, что длины интерферирующих волн  $E_O$  и  $E_S$  не равны. На рис. 2 представлены более детально схема записи  $\chi^2$ -голограммы и ее основные элементы. В качестве источника света был использован одномодовый YAG:Nd-лазер с шириной генерируемых импульсов 300 пс,  $\lambda = 1,064$  мкм (волны  $W_R$  и  $W_I$  на рис. 2). В референтной части схемы



**Рис. 2.** Общая схема записи  $\chi^2$ -голограммы.  $W_I$  и  $W_R$  – плоские волны с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм;  $Cr_1$  – кристалл, вызывающий частотный сдвиг волны  $W_I$ ;  $O$  – объект;  $Cr_2$  – кристалл, обладающий квадратичной нелинейностью;  $O_0$  – изображение, реконструируемое в случае, когда частоты объектной и референтной волн одинаковы;  $O_1$  – изображение, реконструируемое в случае, когда  $\omega_O < \omega_R$ ;  $\Delta l_S$  – расстояние между изображениями  $O_0$  и  $O_1$ .



эти импульсы лазера попадают прямо на кристалл КТР ( $Cr_2$  на рис. 2). Этот кристалл используется в качестве светочувствительного материала, который записывает динамическую голограмму. Кристалл  $(BaNO_3)_2$  вводит рамановский сдвиг  $\Delta\nu = 1047 \text{ см}^{-1}$  в объектную волну  $W_1$  (см.  $Cr_2$  на рис. 2). В общих чертах подход к теории  $\chi^2$ -динамических голограмм аналогичен случаю с ГВГ-голограммами. Предположим, что объектная и референтная волны падают на границу нелинейного светочувствительного материала  $Cr_2$ , обладающего квадратичной нелинейностью. Напряженности объектной волны  $E_O(r, t)$  и референтной  $E_R(r, t)$  волн в светочувствительном материале  $H$  могут быть записаны в виде:

$$E_O(r, t) = A_O(r, t) \exp[i(k_O r + \omega_O t)], \quad (6)$$

$$E_R(r, t) = A_R \exp[i(k_R r + \omega_R t)], \quad (7)$$

где  $k_O$  и  $k_R$  – волновые векторы,  $\omega_O$  и  $\omega_R$  – частоты объектной и референтной волн.

Волновое поле  $E_S(r, t)$ , действующее на нелинейный материал, будет равно сумме полей объектной и референтной волн:

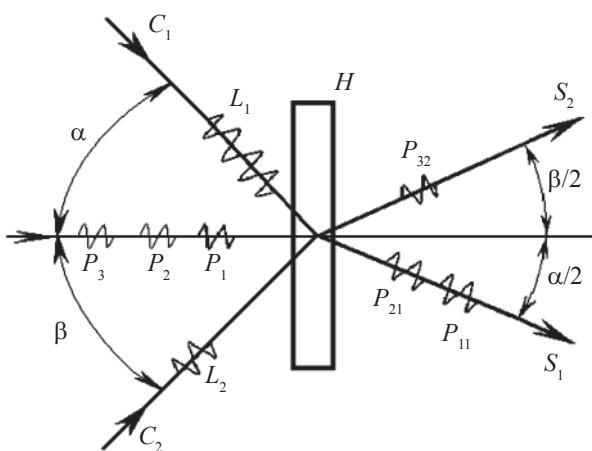
$$E_S(r, t) = E_O(r, t) + E_R(r, t). \quad (8)$$

Взаимодействуя со светочувствительным материалом  $H$ , волновое поле  $E_S(r, t)$  генерирует волну [2]

$$E''(r, t) \approx E_S(r, t) \times E_S(r, t). \quad (9)$$

Подставляя в (9) значения  $E_O(r, t)$  и  $E_R(r, t)$  из выражений (6) и (7) и принимая во внимание только перекрестные члены, найдем выражение для волны, генерируемой  $\chi^2$ -динамической голограммой:

$$E_H(r, t) = 2A_R A_O(r, t) \exp[i(k_0 + k_R)r + (\omega_0 + \omega_R)t]. \quad (10)$$



**Рис. 3.** Голографический переключатель для изменяющегося межсоединения оптических линий межсвязей.

Индекс экспоненты здесь определяет направление распространения лучей света, генерируемых внутри  $\chi^2$ -голограммы.

Вычисление хода этих лучей показало, что рамановский сдвиг частоты объектной волны вызывает поворот волны, реконструированной голограммой, на угол, пропорциональный рамановскому сдвигу частоты.

### 3. Заключение

Наиболее значительным научным результатом настоящего исследования является доказательство того, что  $\chi^2$ -динамическая голограмма может формировать голографическое изображение и что совершает такую операцию практически без какой-либо временной задержки. Действительно, эксперимент показал, что  $\chi^2$ -динамическая голограмма способна создавать голографические изображения в случае, когда частоты объектной и референтной волн значительно отличаются друг от друга. В частности, в нашем эксперименте эта разница была равна одной трети частоты основной волны ( $\lambda = 1,064 \text{ мкм}$ ).

Нет никаких сомнений в том, что голограммы с такими свойствами найдут разнообразное применение в световых линиях связи. Так, на рис. 3 представлена схема безынерционного переключения линий оптической связи. В этом случае сигнал  $P_1, P_2, P_3 \dots$  распространяется от источника  $S_0$ .  $L_1$  и  $L_2$  – это линзы, которые управляют направлением распространения сигнала.  $H$  – ГВГ-голограмма. В случае, когда  $P_1, P_2, P_3 \dots$  интерферирует внутри квадратично-нелинейного материала  $H$  с пучком  $C_1$ , ГВГ-голограмма направляет его вдоль линии  $S_1$ . Если сигнал интерферирует с пучком  $C_2$ , голограмма направляет его вдоль линии  $S_2$ . Используя свойства  $\chi^2$ -динамической голограммы, возможно построить и другие схемы переключений сигнала между различными линиями оптической связи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (грант РИ-112/001/170) и РФФИ (грант 04-02-17593).

### Литература

1. Gabor D. Microscopy by reconstructed wave front // Proc. Royal Society. 1949. V. A197. P. 454–468.
2. Saleh B.E.A. and Teich M.C. Fundamentals of Photonics // Series in Pure and Applied Optics / Ed. by Goodman J.W. N.Y.: Wiley, 2000. P. 739–743.
3. Denisjuk Yu.N., Andreoni A., and Potenza M.A.C. Holographic properties of the effect of second-order har-

monic correlation of optical wavefields // *Optical Memory & Neural Networks*. 1999. V. 8. № 3. P. 123–137.

4. Стаселько Д.И., Денисюк Ю.Н., Сизов В.Н. Формирование изображений безынерционными динамиче-

скими голограммами, записанными в среде с квадратичной нелинейностью при различных частотах объектной и референтной волн // *Оптика и спектроскопия*. 2002. Т. 93. № 3. С. 496–508.

## РОМАНТИКА НАУЧНЫХ БУДНЕЙ (НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ ГОЛОГРАФИИ)

Г. В. ОСТРОВСКАЯ, доктор физ. мат. наук,

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

E-mail: galya\_ostr@mail.ru

На основе личных воспоминаний и впечатлений автора дан краткий обзор становления некоторых направлений голографии в бурный и исключительно плодотворный период ее развития – с начала 60-х до середины 70-х годов прошлого века.

### 1. Введение

В 60-е – 70-е годы я оказалась свидетелем (и, в какой-то мере, участником) стремительного развития новой области оптики – квантовой электроники, куда входят такие научные направления, как физика лазеров, взаимодействие лазерного излучения с веществом и голография. На моих глазах оптика, которая еще совсем недавно представлялась давно сложившейся и устоявшейся наукой, в которой все давно исследовано еще со времен Ньютона и Френеля, превратилась в одно из самых модных направлений физики.

Неоценимый вклад в развитие голографии внес Юрий Николаевич Денисюк, предложивший и разработавший методы записи голограмм во встречных пучках в трехмерных средах. Знакомство с Юрием Николаевичем и многочисленные научные контакты с ним оставили глубокий след в моей памяти. Особенно близко контактировал с Ю.Н. Денисюком мой муж, Ю.И. Островский, являвшийся его заместителем по секции “Оптической голографии” Научного совета АН СССР по проблеме “Голография”. Отношения Ю.И. Островского и Ю.Н. Денисюка из чисто деловых переросли в теплые дружеские. Мы ходили друг к другу в гости, ездили вместе за грибами, а одно лето мы даже вместе путешествовали на машинах по Карелии и отдыхали в палатках на берегу Ладожского озера. После смерти моего мужа Юрий Николаевич был бессменным председателем комиссии по присуждению премий на конкурсе им. Ю.И. Островского.

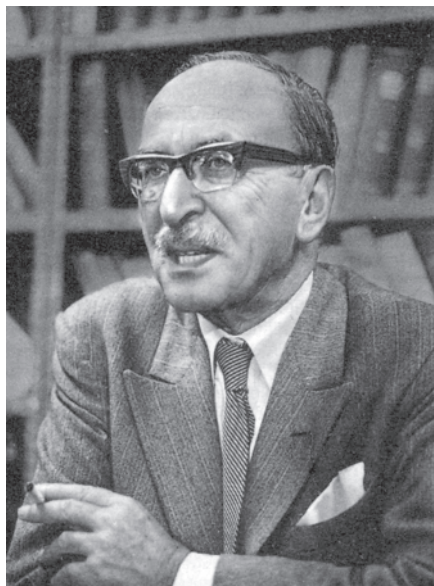
В настоящей статье я постараюсь рассказать о начальном этапе развития работ в области голографии, голографической интерферометрии и голографической диагностики плазмы. Годы эти кажутся мне романтическими, возможно, потому, что мы были свидетелями и участниками бурного развития новых перспективных научных направлений, а возможно, просто потому, что все мы были в то время молоды и полны энтузиазма.

### 2. Краткие сведения из истории голографии

Голография берет свое начало от первой, опубликованной в 1948 году, работы английского физика (выходца из Венгрии) – Дениса Габора [1], предложившего метод записи и восстановления волнового фронта, названный им голографией, что, в переводе с греческого, означает “полная запись”. В отличие от фотографии, которая регистрирует только интенсивность световой волны, голография регистрирует и позволяет восстановить как амплитуду, так и фазу волны, т. е. форму ее волнового фронта. Ввиду отсутствия в те времена источников излучения, обладающих высокой когерентностью, метод Габора не нашел тогда широкого применения и был забыт.

Первые работы Юрия Николаевича Денисюка [2], в которых излагался предложенный им метод регистрации волновых фронтов во встречных пучках, были опубликованы в 1962–1963 годах в журналах ДАН СССР и “Оптика и спектроскопия”. Статья, направленная в “Оптику и спектроскопию” и написанная, по-видимому, намного раньше ее публикации, имела трудную судьбу. В редакции журнала не поняли новаторских идей Ю.Н. Денисюка, изложенных им в довольно сложной форме, и отказались ее публиковать, а один из известных академиков – членов редколлегии даже сказал якобы, что этот бред опубликуют в журнале только через его труп. Статья была опубликована только после активного вмешательства главного редактора журнала чл.-корр. АН С.Э. Фриша.

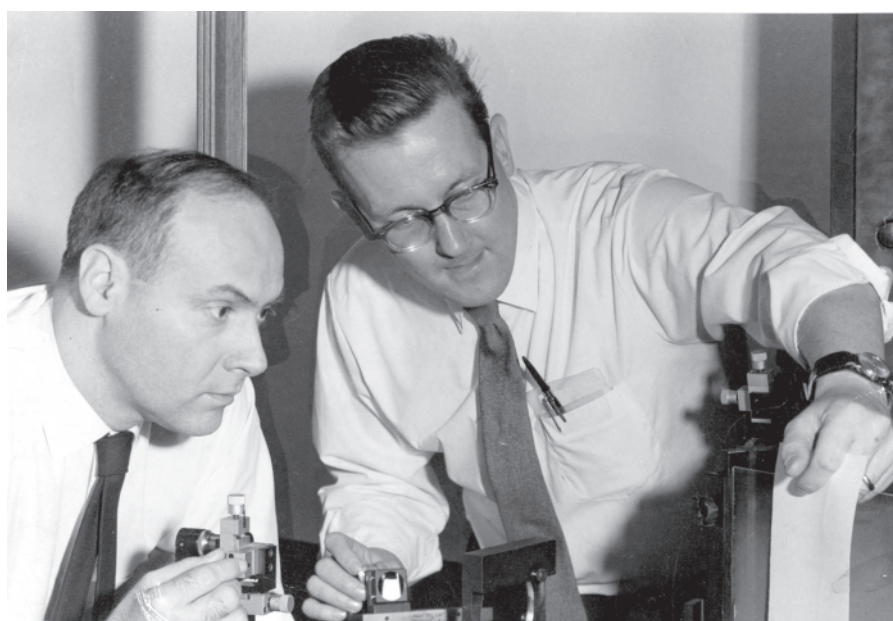
В первых своих опытах по записи голограмм в трехмерных средах в качестве источника света Ю.Н. Денисюк применил ртутную лампу (лазера у него тогда не было), а в качестве объекта – использовал вогнутое зеркало. Записанная им голограмма не просто отражала свет, но и обладала теми же фокусирующими свойствами, что и само зеркало. Однако сенсации эти эксперименты в то время не произвели.



Денис Габор



Юрий Николаевич Денисюк



Эммет Лейт и Юрис Упатниецс

**Рис. 1.** Основоположники голографии.

Новое дыхание голография получила после изобретения лазеров. Первые лазерные голограммы были получены в США Лейтом и Упатниеком [3] в 1962 году и сразу стали сенсацией в научном мире. О работах Денисюка вспомнили только после появления в печати статей Лейта и Упатниека и начала настоящего голографического бума.

Денисюку предложили защищать докторскую диссертацию по совокупности трудов, головной организацией по его защите назначили ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а отзыв об этой диссертационной работе было поручено написать А.Н. Зайделю и Ю.И. Островскому. Так Юрий Николаевич познакомился сначала с работами Денисюка, а затем, на про-

шедшей с блеском защите его диссертации, и с самим Юрием Николаевичем. Мы с интересом и радостью наблюдали за стремительным взлетом карьеры Юрия Николаевича, присвоением ему звания члена-корреспондента<sup>1</sup> АН СССР и присуждением Ленинской премии, за перипетиями выдвижения его на Нобелевскую премию.

К сожалению, этой премии он не получил по формальным мотивам. Дело в том, что согласно уставу

<sup>1</sup> Интересно, что звание членкора Ю.Н. Денисюк получил еще будучи кандидатом технических наук, о чем свидетельствует автореферат моего бывшего аспиранта Л.Л. Шапиро, у которого Юрий Николаевич был официальным оппонентом.



Нобелевского комитета, авторский коллектив, выдвигаемый на премию, не должен превышать трех человек. В данном же случае на премию по голографии могли претендовать четверо ученых – Д. Габор (Великобритания), Лейт и Упатниекс (США) и Денисюк (СССР). Работы последних трех ученых появились практически одновременно в 1962–1963 годах, и исключить кого-то одного из них из авторского коллектива было бы несправедливо. Поэтому Комитет принял решение – присудить Нобелевскую премию Денису Габору, чей приоритет в области голографии (1948 год) был бесспорным и общепризнанным. В беседах с нами Юрий Николаевич признавал справедливость этого решения, он говорил, что ему было бы очень обидно, если бы из списка вычеркнули его одного.

### **3. Начало работ по голографии в ФТИ им. А.Ф. Иоффе**

Следует отметить, что большую роль в судьбе как самого Ю.Н. Денисюка, так и советской голографии в целом, сыграл директор ФТИ им. А.Ф. Иоффе академик Б.П. Константинов, у которого было острое чутье ко всему новому и перспективному в науке. В частности, в начале 60-х Борис Павлович заинтересовался возможностью применения лазеров для исследования плазмы. В 1962 году, вскоре после моего прихода в ФТИ, мне было поручено сделать доклад о перспективах использования рассеяния лазерного излучения для диагностики плазмы. Доклад состоялся в кабинете Б.П. Константинова, в присутствии многочисленных завлабов и академиков. Работы в этом направлении были признаны перспективными, и в лаборатории А.Н. Зайделя, при моем участии, было начато строительство первого в ФТИ импульсного рубинового лазера. Когда нам удалось получить генерацию, Борис Павлович лично пришел в лабораторию и поздравил нас с успехом. По представлению Б.П. Константинова были опубликованы и наши первые работы по использованию лазерного излучения для диагностики плазмы [4–5], что в значительной степени определило направление моих дальнейших научных исследований.

Сразу же после публикации работ Лейта и Упатниекса и начала голографического бума Борис Павлович заинтересовался голографией и привлек к работам в этой области своего сына В.Б. Константинова (в то время студента-дипломника). В начале 1965 года в ФТИ был принят на должность старшего научного сотрудника лаб. А.Н. Зайделя (с санкции Б.П. Константинова) Ю.И. Островский, и Борис Павлович привлек его, как опытного интерферометриста, к начавшимся в его лаборатории исследованиям.

Уже в начале 1966 года были выполнены первые работы по измерению разрешающей способности голографического метода и лазерной резольвотметрии [6, 7], а в 1968 году (совместно с С.Б. Гуревичем и его сотрудниками) – первая работа по голографической передаче изображения через телевизионную систему [8]. Таким образом, Юрий Исаевич был обязан Борису Павловичу не только тем, что был принят в ФТИ, но и началом своих работ в области голографии, которые во многом определили его научное будущее.

Следует также отметить, что Б.П. Константинов был ответственным редактором написанной Ю.И. Островским книги “Голография” [9], изданной в 1970 году. В этой книге в доступной и интересной форме (практически, на пальцах) излагались основы голографии, свойства голограмм, рассматривались возможности применения голографии в науке и технике. Книга эта сразу же стала “бестселлером”. Огромное большинство ученых, которые в конце 60-х начали заниматься голографией, первому знакомству с этой новой областью науки были обязаны этой маленькой популярной книге Ю.И. Островского. В дальнейшем эта книга многократно переиздавалась, как на русском языке, так и в переводах на английский, немецкий и итальянский языки.

### **4. Голографическая интерферометрия**

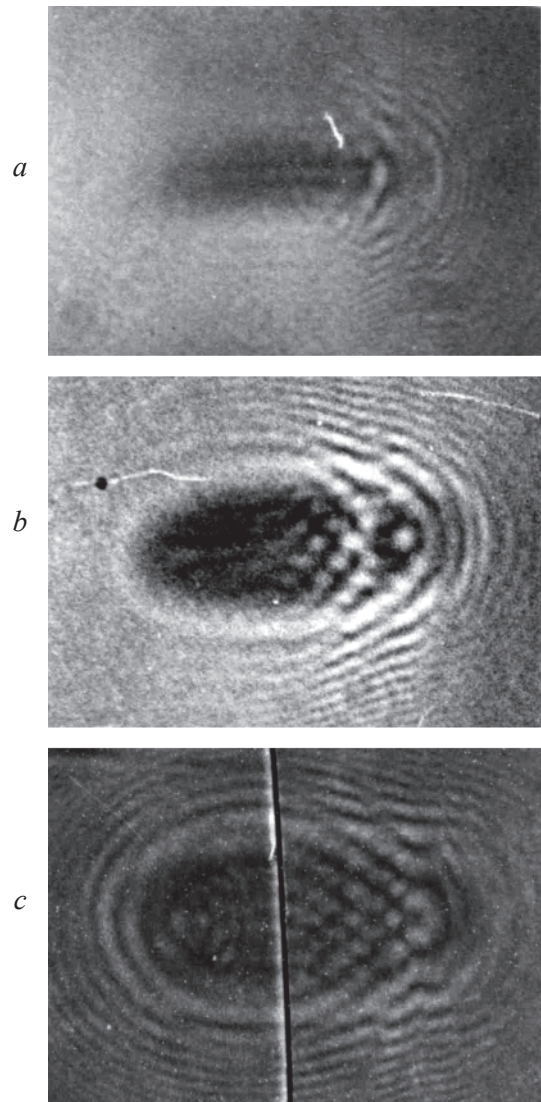
Принципы, на которых основана голографическая интерферометрия, настолько просты и очевидны, что были высказаны практически одновременно (в 1965 году) целым рядом ученых [10–15]. Когда Ю.И. Островский в начале 1966 года прочел одну из первых работ по голографической интерферометрии, он даже расстроился – как ему, опытному интерферометристу, знакомому уже с основами голографии, не пришла в голову такая простая и в то же время красивая идея! Суть метода голографической интерферометрии заключается в том, что на одну фотопластинку записываются две голограммы, соответствующие двум состояниям объекта. На стадии восстановления, такая “двухэкспозиционная” голограмма восстанавливает две волны, которые, интерферируя между собой, образуют интерференционную картину, соответствующую изменениям состояния объекта. Возможен и другой вариант, когда восстановленная голограммой волна интерферирует с волной, отраженной непосредственно от объекта (голографическая интерферометрия в “реальном времени”). В обоих случаях метод голографической интерферометрии является дифференциальным, то есть интерферограмма фиксирует только изменения волновых фронтов, связанные с изменением исследуемого объекта, все же искажения, обус-

ловленные несовершенством оптических элементов, через которые проходят лазерные пучки при записи голограммы, полностью исключаются. Ю.И. Островский сразу же осознал преимущества голографической интерферометрии перед обычной классической, в частности возможность интерференционного исследования деформаций объектов, имеющих шероховатую поверхность; исследование плазмы, заключенной в сосуд с неоднородными стенками; изучение объектов практически неограниченных размеров и т. д. С этого момента голографическая интерферометрия стала основным направлением его исследований. Им и его сотрудниками и аспирантами Ащеуловым, Дымниковым, Малхасяном, Листавцом и др. были разработаны многочисленные интерференционно-голографические методы исследования вибраций, деформаций, напряжений, рельефа. В 1977 г. Ю.И. Островским (совместно с М.М. Бутусовым и Г.В. Островской) была опубликована первая монография по голографической интерферометрии [16].

### 5. Голографическая диагностика плазмы

В начале 60-х годов в лаборатории А.Н. Зайделя были начаты исследования лазерной искры. Лазерная искра – это плазменное образование, возникающее при диэлектрическом пробое газа при фокусировании в нем мощного лазерного излучения. Направление это казалось в то время очень перспективным, поскольку, благодаря огромной плотности энергии в области фокусировки лазерного луча, возникли надежды на возможность нагрева плазмы лазерной искры до очень высоких температур, достаточных для начала термоядерной реакции. Впрочем, вскоре на этом пути обнаружили существенные трудности, так что на конференции, посвященной проблеме “лазерного термояда”, один профессор из Курчатовского института Атомной энергии, предостерегая своих коллег от слишком радужных надежд, заявил в своем выступлении, что он вывел такую аксиому: “Термояд – это крепость равно неприступная со всех сторон”.

В наших исследованиях мы не ставили перед собой столь глобальных задач и занимались, в основном, разработкой новых методик исследования плазмы лазерной искры и их применением для детального изучения физических процессов, в ней происходящих. В начале 1965 года нами были проведены первые исследования динамики развития лазерной искры с помощью теневого метода. Для получения теневых фотографий лазерной искры [17] использовалось излучение того же лазера, который создавал лазерную искру, задержанную на определенное время (от 30 до 100 наносекунд) за

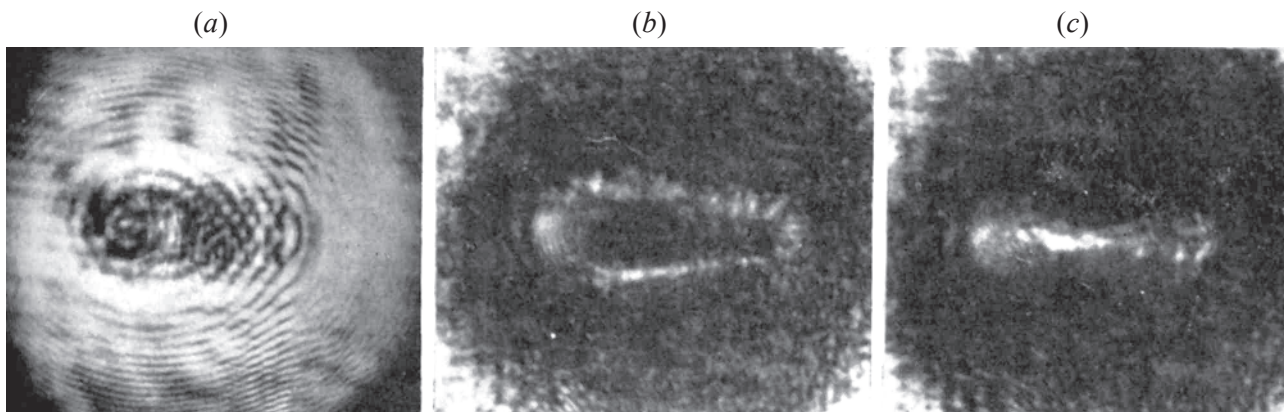


**Рис. 2.** Теневые фотографии лазерной искры на разных стадиях ее развития: *a* – 31 ns, *b* – 64 ns, *c* – 110 ns.

счет прохождения световой линии задержки. Обращает на себя внимание сложная интерференционно-дифракционная структура (рис. 2), видимая на полученных нами фотографиях.

Весной 1966 года Ю.И. Островский сделал доклад об основах голографии на семинаре нашей лаборатории. Когда он нарисовал на доске схему получения голограмм по методу Габора (без опорного пучка), я задала ему вопрос, чем, собственно, отличается схема Габора от схемы получения теневых изображений (метод светящейся точки), который мы использовали в своих исследованиях лазерной искры. Подумав, Островский сказал: “Пожалуй, ничем”.

Сразу после семинара, прихватив фотопластинки, на которых были сняты теневые фотографии лазерной искры, мы отправились в лабораторию Б.П. Константинова, где в то время был единственный в ФТИ гелий-неоновый лазер. Там нам удалось не только восстановить с помощью этих теневых



**Рис. 3.** Однолучевая голограмма лазерной искры (а), восстановленное изображение контуров лазерной искры (b), фокальное пятно эквивалентной астигматической линзы (с).

фотографий четкие контуры лазерной искры, но и обнаружить фокусирующее действие плазмы (рис. 3), по которому можно было оценить ее электронную плотность. Так появилась наша первая работа [18] по голографической диагностике плазмы, которая была выполнена и опубликована на год раньше работ американских ученых в этой области [19]. Эту свою статью мы с Ю.И. Островским отправили основоположнику голографии – профессору Габору, который в ответ прислал нам свою небольшую брошюру по голографии, а также ряд ценных советов по работе.

Лазерная искра оказалась чрезвычайно удобным объектом для отработки различных голографических методов диагностики. Так, в том же 1966 году были опубликованы наши первые исследования лазерной искры методами киноголографии и голографической интерферометрии [20–21].

В 1967 году Ю.И. Островским и его сотрудниками [22] были получены голографические интерферограммы плазмы импульсного разряда, заключенного в оптически неоднородную кварцевую трубку. Были также начаты работы по резонансной голографической интерферометрии [23], в которой с целью селективного увеличения чувствительности к определенному сорту атомов, интерферограммы плазмы получают в свете лазера на красителе, настроенного на частоту резонансной линии данных атомов. В этих работах участвовала Г.В. Дрейден и аспирантка Ю.И. Островского Е.Н. Шедова.

В моей же группе в это время был разработан голографический метод измерения поглощения, нечувствительный к собственному излучению плазмы, а также получены пятикадровые двухэкспозиционные киноголограммы лазерной искры (1968 г.) и выполнены интерференционно-голографические исследования плазмы в свете двух длин волн – основной частоты и второй гармоники рубинового

лазера (1969–1970 гг.). В этих работах участвовала моя сотрудница И.И. Комиссарова и наш с А.Н. Зайделем новый (и очень толковый) аспирант – Л.Л. Шапиро.

Уже в 1968 году А.Н. Зайделем, Ю.И. Островским и мной была опубликована в ЖТФ большая обзорная статья по голографической диагностике плазмы [24]. Более чем через 30 лет (в 2001 г.) английский вариант этой статьи был переиздан в сборнике “Selected papers on Holographic Interferometry”.

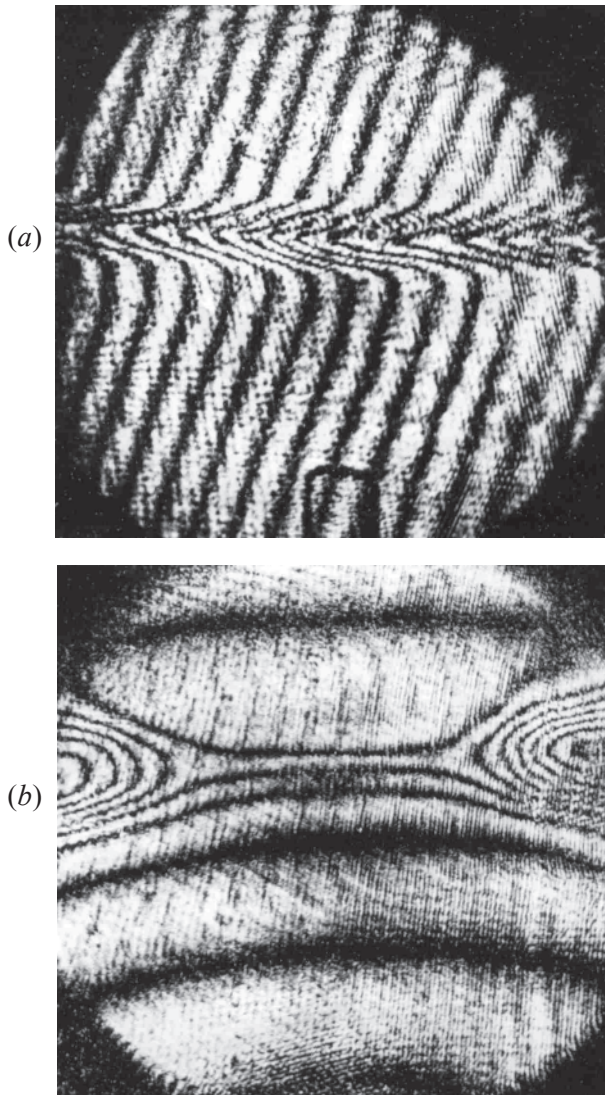
В 1970 году мною и Ю.И. Островским был придуман новый и оригинальный метод – дисперсионная голографическая интерферометрия [25], в котором, на стадии восстановления, наблюдалась картина интерференции волны, одна из которых соответствует второму дифракционному порядку основной частоты рубинового лазера, а вторая – первому порядку волны, соответствующей второй гармонике лазерного излучения. Было показано, что такого рода “дисперсионные” интерферограммы нечувствительны к изменениям концентрации атомов и ионов в плазме, и сдвиги интерференционных полос на них обусловлены только распределением электронной плотности.

В 1972 году началось наше сотрудничество с ФИАН им. Лебедева по интерференционно-голографическому исследованию токовых слоев. В нашей лаборатории в ФТИ была создана и отлажена голографическая установка для регистрации голограмм плазмы большого сечения (100 мм). В 1973 году голографическая установка была перевезена в Москву, где в лаборатории М.С. Рабиновича, в группе А.Г. Франк находилась плазменная установка ТС-3, предназначенная для исследования процессов формирования токовых слоев.

Каково же было наше отчаяние, когда, заглянув в плазменную камеру (длинную кварцевую трубу), по оси которой должен был проходить объектный лазерный пучок, мы обнаружили, что оба торца ка-



меры перекрыты плотными сетчатыми электродами. В первый момент положение казалось безнадежным, но, подумав и проконсультировавшись по телефону с Ю.И. Островским, мы решили применить метод пространственной фильтрации излучения, дифрагировавшего на этих сетках. Выделив нулевой порядок дифракции с помощью диафрагмы, мы использовали его для записи голограмм. Промучившись довольно долго с отладкой сложной оптической схемы, мы, в конце концов, получили вполне приличные голографические интерферограммы токовых слоев (рис. 4) [26], после чего кто-то из наших коллег изрек следующую аксиому: *“Голография может все”*. В дальнейшем мы не раз вспоминали это выражение, когда перед нами ставились все новые задачи, которые в первый момент казались невыполнимыми, а затем все-таки решались



**Рис. 4.** Первые голографические интерферограммы плазмы в окрестности нейтрального токового слоя: (а) – в полосах конечной ширины, (б) – в полосах бесконечной ширины.

методами голографии. Заметим, что работы по голографическому исследованию токовых слоев продолжают в ИОФ РАН и в настоящее время.

## 6. Конференции и школы по голографии

Среди научных мероприятий, в которых мне довелось участвовать в эти годы, особое место занимают **школы по голографии**. Идея проведения ежегодных зимних школ по голографии на базе Московского Физико-технического института (МФТИ) принадлежала Борису Павловичу Константинову, который был избран председателем ее оргкомитета, а его заместителем стал профессор МФТИ Г.В. Скроцкий, на котором и лежал основной груз организационной работы. Основная задача школы состояла в повышении квалификации специалистов, работающих в области голографии.

**Первая школа по голографии** состоялась в январе 1969 года в Долгопрудном в здании МФТИ. Открывал ее сам Б.П. Константинов. Он также выступил на ней с большим докладом *“Голография в кино и телевидении”*. Среди лекторов школы были профессора МФТИ, сотрудники ФТИ им. Иоффе, ГОИ и других московских и ленинградских научных и учебных институтов.

На первой школе Ю.И. Островский прочел лекцию по голографической интерферометрии. В конце школы всем слушателям и лекторам были розданы анкеты, в которых они должны были вписать фамилии лучших лекторов. Рейтинг Ю.И. Островского оказался самым высоким, и он был объявлен *“Лучшим лектором школы”*. Этот почетный титул он получал и на большинстве последующих школ по голографии. Во время перерывов, в кулуарах школ, Ю.И. Островский все время был окружен толпой слушателей, которые пытались получить от него ответы на самые разные вопросы, от чисто научных, до практических, таких как: где можно достать пленку или пластинки для записи голограмм; какой лазер наиболее пригоден для голографии; где его можно купить и т. д. Многие просили Юрия Исаевича принять их к себе на стажировку или приглашали его прочесть лекции в своих институтах.

В период между первой и второй школой (летом 1969 года) умер от инфаркта Б.П. Константинов. С тех пор оргкомитет школы возглавлял Георгий Викторович Скроцкий, ставший ее бессменным ректором.

Школы происходили не только в Долгопрудном, но и во многих других интересных местах: в Ульяновске, на базе мемориального центра В.И. Ленина; в Ростове Великом, где участники школы были размещены в кельях монастыря, а обедали в трапезной; в молодежном центре в окрестностях Мин-



ска, где мы между лекциями катались на лыжах, а после закрытия школы ездили на экскурсию в Брест и Беловежскую Пущу и т. д.

Я также участвовала в большинстве школ в роли лектора. Трудность чтения лекций на школе по голографии состояла в том, что у слушателей был очень разный уровень подготовки. Поэтому нужно было изложить материал в как можно более доступной и в то же время строгой форме. А главное, знать по данному вопросу надо было на несколько порядков больше вошедшего в лекцию материала, чтобы суметь достойно ответить на самый хитрый вопрос сидевших в аудитории профессоров. Чтению лекций я во многом училась у Ю.И. Островского, перенимая его манеру четкого и ясного изложения.

Самой интересной и яркой из школ по голографии была **пятая Международная школа**, состоявшаяся в январе 1973 года в Академгородке под Новосибирском. Ехали мы туда на поезде по Транссибирской магистрали, в Новосибирск прибыли с большим опозданием из-за снежных заносов, часа в два ночи. Какова же была наша радость, когда, не успев наш поезд остановиться, как в наш вагон запрыгнули встречавшие нас сотрудники из Академгородка. По обжигающему морозу (было существенно ниже 40 градусов) нас повели к ожидавшим нас автобусам. Мне кажется, что мы оказались в каком-то фургоне с брезентовым верхом и без окон, во всяком случае, мы совсем не видели, куда нас везут. Высадили нас у входа в Академическую гостиницу. Еще несколько метров по морозу, и мы оказались в теплом и светлом вестибюле. Нам сразу же, не оформляя документы, роздали ключи от комнат и отправили отдыхать.

Проснулась я утром от яркого солнца, заливавшего наш номер. Выглянула из окна и увидела сугробы белоснежного сверкающего на солнце снега, запорошенные снегом огромные сосны и, около самого нашего окна, на сосновой ветке – белку, которая с любопытством смотрела на меня. У нас сразу же поднялось настроение, и это ощущение праздника не покидало нас все дни, пока продолжалась эта школа. В холле гостиницы нас зарегистрировали, выдали программу конференции и сообщили о планах на ближайший день – о предполагавшемся катании на санях по Академгородку.

За завтраком, в ресторане гостиницы мы познакомились со многими иностранными учеными – Лейтом, Ломаном, Строуком, Коком, Абрамсоном и др., с которыми Ю.И. Островский был знаком ранее только по переписке. В назначенное время все участники конференции собрались у входа в гостиницу, чтобы принять участие в катании на санях, так что выстроилась целая очередь. Но скоро все мы замерзли и вернулись в вестибюль гостиницы.

Особенно страшно было смотреть на иностранных ученых – они оказались совсем неготовыми к суровым сибирским морозам: Кок был хотя и в меховом полушубке, но совсем без шапки, только с круглыми меховыми наушниками на лысой голове. У Лейта на голове была кепка, и не было шарфа, а прибывший из калифорнии Ломан был в каком-то странном, желтом демисезонном пальто, явно с чужого плеча, висевшем на нем, как на вешалке. Тем не менее, никто из них не хотел упустить своего шанса прокатиться по морозу на санях с бубенцами.

Когда подошла очередь Лейта, Островский уговорил его надеть свою меховую шапку-ушанку и шерстяной шарф. Потом эту шапку надевали по очереди и на других иностранцев, и только Кок решительно отказался от каких-либо головных уборов – так и поехал кататься в своих наушниках с голой головой. Мы с Юрой тоже прокатились с ветерком в санях – Юра спустил уши у своей шапки, а я поверх меховой шапки повязалась теплым пуховым платком до самых глаз.

На следующий день в Доме ученых Академгородка начались занятия школы. На открытии выступали члены Оргкомитета, представители Сибирского отделения АН и партийных органов Новосибирска. От имени иностранных ученых выступил Ломан, который благодарил организаторов за предоставленную возможность побывать в Сибири, и назвал эту школу по голографии самой холодной из всех, на которых ему когда-либо приходилось присутствовать. Так, с его легкой руки, эту школу и стали называть “Low Temperature School”.

Из многочисленных лекций, прочитанных на этой школе, больше всех мне понравилась лекция Ломана о цифровой голографии. Он был прекрасным лектором, перемежал свою очень серьезную лекцию забавными шутками и анекдотами. Так, начал он с того, что, будучи немцем по происхождению, он плохо говорит по-английски, и поэтому его очень хорошо понимают студенты из стран Латинской Америки, которых очень много в Калифорнии, где он преподает. Поэтому он считается лучшим лектором Калифорнии. Он выразил также надежду на то, что его английский будет понятен и русским слушателям, так что он станет лучшим лектором этой низкотемпературной школы. Еще Ломан рассказал забавную историю о том, как он придумал цифровую голографию. Все было очень просто – он получил приглашение на конференцию в Париж, но, чтобы поехать туда, нужно было иметь доклад, а у него в лаборатории в это время сломался гелий-неоновый лазер. Однако желание поехать в Париж было так сильно, что он придумал, как можно записывать голограмму без лазера с помощью ЭВМ. Так родилось новое и очень интересное направление – циф-



А.Н. Зайдель



Ю.И. Островский



Г.В. Островская

**Рис. 5.** Фотографии, снятые в 1973 году для участия в чтениях Д.С. Рождественского.

ровая голография. Лекция Ломана произвела впечатление не только на меня, но и на большинство слушателей, так что при подведении итогов рейтинг Ломана оказался выше даже чем у самого Островского, который на этот раз занял второе место среди лекторов.

Запомнились, конечно, и Всесоюзные конференции по голографии, первая из которых состоялась в Тбилиси в 1969 году. Ее открытие происходило в большом филармоническом зале на улице Руставели. Особенно запомнилось выступление грузинского академика, возможно даже президента АН Грузии. Он, по-видимому, не был физиком (возможно, он был философом) и в своем докладе развивал свои гипотезы о том, что процесс мышления человека происходит в результате образования в мозгу каких-то структур, похожих на голограммы, которые он называл “голонами”. Эти идеи выглядели достаточно фантастичными и ни на какие факты не опирались, так что у людей, серьезно занимающихся голографией, вызывали только улыбки, однако речь его была такой экспансивной и артистичной, а внешность такой импозантной и располагающей к себе, что он заслужил громкие аплодисменты всей аудитории.

На этой конференции мы познакомились с очень интересным и талантливым грузинским ученым – Ш.Д. Какичашвили, который развивал в своих работах теорию поляризационной записи голограмм, а в лаборатории разрабатывал среды, чувствительные не только к интенсивности, но и к направлению поляризации излучения. Шармазан Дмитриевич водил нас в свою лабораторию, расположенную в подвале старой грузинской церкви, где практически не ощущались вибрации от уличного транспорта и можно было без специальной амортизации снимать прекрасные художественные голограммы по

методу Денисюка. Впоследствии мы часто встречались с Ш.Д. Какичашвили на школах, конференциях и различных семинарах по голографии, многие из которых, в значительной степени благодаря ему, проходили в Тбилиси.

Во время этой командировки мы много и с удовольствием гуляли по Тбилиси, где нашим гидом был наш (мой и Зайделя) бывший аспирант – Таризел Челидзе, первый из моих учеников, защитивших кандидатскую диссертацию. В общем, от пребывания в Тбилиси, и во время этой конференции, в последующие мои приезды туда, всегда оставалось ощущение праздника и искреннего гостеприимства всех людей, с которыми нам приходилось там встречаться.

Еще одно научное мероприятие, которое здесь следует упомянуть, это **27-е чтения им. Д.С. Рождественского**, состоявшиеся весной 1973 года в Оптическом институте. Чтения эти регулярно проводились в ГОИ в честь создателя этого института и его первого директора академика Рождественского. Участие в чтениях Рождественского является большой честью для ученых-оптиков и предоставляется только один раз в жизни. На каждом чтении докладываются только две работы, отобранные конкурсной комиссией. Работу мы представили от имени А.Н. Зайделя, Г.В. Островской и Ю.И. Островского и озаглавили ее “Голографическая интерферометрия импульсных и периодических процессов”, объединив, таким образом, в одном докладе наши работы по голографической диагностике плазмы и работы по голографической виброметрии. Наши работы в этой области были уже широко известны, а приоритет общепризнан. Кроме того, эти работы были созвучны по духу работам самого Рождественского, который внес огромный вклад в развитие

классической интерферометрии. Перед очередными чтениями в холле перед актовым залом выставляются портреты всех ученых, выступавших когда-либо на чтениях Рождественского, и нас попросили принести свои фотографии, которые я привожу в конце настоящей статьи (рис. 5).

## 7. Заключение

В заключение я хочу сказать, что десятилетие с 1965 по 1975 год было и для меня и для моего мужа, Ю.И. Островского, пожалуй, самым плодотворным в нашей научной деятельности. В этот период мною было опубликовано около 40, а Ю.И. Островским – порядка 70 научных работ и изобретений. По материалам этих работ мы оба защитили докторские диссертации. Темой докторской диссертации Ю.И. Островского, которую он защитил в начале 1974 года, являлась “Голографическая интерферометрия физических процессов”. Позднее им был написан ряд монографий по голографической интерферометрии, изданных как в нашей стране, так и за рубежом, так что он по праву считается основоположником отечественной школы голографической интерферометрии.

Темой же моей докторской диссертации, защищенной в 1976 году, явилась “Разработка оптических методов диагностики плазмы и их применение для исследования лазерной искры в газах”. Голографическая интерферометрия для меня всегда была, и является до настоящего времени, лишь инструментом для получения сведений о параметрах и динамике исследуемой мною плазмы.

## Литература

1. *Gabor D.* A new microscope principle // *Nature*. 1948. V. 6. P. 777–778.
2. *Денисюк Ю.Н.* Фотографическое отображение оптических свойств объекта в поле рассеянного им излучения // *ДАН СССР*. 1962. Т. 144. № 6. С. 1275–1276 // *Опт. и спектр*. 1963. Т. 15. № 4. С. 522–532.
3. *Leith E., Upatnieks J.* Reconstructed wave fronts and communication theory // *JOSA*. 1962. V. 52. P. 1123–1130.
4. *Зайдель А.Н., Малышев Г.М., Островская Г.В.* Использование оптического квантового генератора для диагностики плазмы // в сб. “Диагностика плазмы”. М.: Госатомиздат, 1963. С. 31–35.
5. *Малышев Г.М., Островская Г.В., Раздобарин Г.Т., Соколова Л.В.* Определение температуры и концентрации электронов в плазме дуги по томсоновскому рассеянию лазерного излучения // *ДАН СССР*. 1966. Т. 168. № 3. С. 554–555.
6. *Константинов Б.П., Зайдель А.Н., Константинов В.Б., Островский Ю.И.* Фотографирование в когерентном свете. Экспериментальная техника и разрешающая способность метода // *ЖТФ*. 1966. Т. 36. № 9. С. 1718–1721.

7. *Зайдель А.Н., Константинов В.Б., Островский Ю.И.* Лазерная резольвометрия // *Журнал науч. и прикл. фотографии и кинематографии*. 1966. Т. 11. № 5. С. 381–382.
8. *Гуревич С.Б., Гаврилов Г.А., Константинов А.Б. и др.* Голографическая передача изображения через телевизионную систему // *ЖТФ*. 1968. Т. 38. № 3. С. 513–519.
9. *Островский Ю.И.* Голография // Л.: Наука, 1970, 123 с.
10. *Brooks R., Heflinger L., Wuerker R.* Interferometry with a holographically reconstructed comparison beam // *Appl. Phys. Lett.* 1965. V. 7. P. 248–249.
11. *Burch J.* The application of lasers in production engineering // *Prod. Eng.* 1965. V. 44. P. 431–442.
12. *Horman M.H.* An application of wavefront reconstruction to interferometry // *Appl. Opt.* 1965. V. 4. P. 333–336.
13. *Collier R.I., Doherty E.T., Pennington K.S.* Application of moiré techniques to holography // *Appl. Phys. Lett.* 1965. V. 7. P. 223–225.
14. *Powell R.L., Stetson K.A.* Interferometric analysis by wavefront reconstruction // *JOSA*. 1965. V. 55. P. 1593–1598.
15. *Heines K.A., Hildebrand B.P.* // *Phys. Lett.* 1965. V. 19. P. 10.
16. *Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В.* Голографическая интерферометрия // М.: Наука. 1977. 339 с.
17. *Малышев Г.М., Островская Г.В., Челидзе Т.Я.* Теневые проекции искры в воздухе, возникающей при фокусировании излучения лазера // *Оптика и спектроскопия* 1966. Т. 20. С. 374–375.
18. *Островская Г.В., Островский Ю.И.* Голографическое исследование лазерной искры. // *Письма ЖЭТФ*. 1966. Т. 4. № 4. С. 121–124.
19. *Jagoda F.C., Jeffries R.A., Sawyer G.A.* Fractional-fringe holographic plasma interferometry // *Appl. Opt.* 1967. V. 6. P. 1407–1410.
20. *Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И., Челидзе Т.Я.* Голографирование лазерной искры с временным разрешением // *ЖТФ*. 1966. Т. 36. № 12. С. 2208–2210.
21. *Kakos A., Ostrovskaya G.V., Ostrovskii Y.I., Zaidel A.N.* Interferometry holographic investigation of a Laser spark // *Phys. Lett.* 1966. V. 23, № 1. P. 81–83.
22. *Ashcheulov A.N., Dymnikov A.D., Ostrovsky Yu.I., Zaidel A.N.* An interferometric holographic investigation of the pulsed discharge plasma // *Phys. Lett.* 1967. V. 25A. № 1. P. 61–62.
23. *Dreiden G.V., Ostrovsky Yu.I., Shedova E.N., Zaidel A.N.* Holographic interferograms in stimulated Raman light // *Opt. Comm.* 1971. V. 4. № 3. P. 209–213.
24. *Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И.* Голографическая диагностика плазмы // *ЖТФ*. 1968. Т. 38. № 9. С. 1405–1419.
25. *Островская Г.В., Островский Ю.И.* Двухдлинноволновый голографический метод изучения дисперсионных свойств фазовых объектов. // *ЖТФ*. 1970. Т. 40. № 11. С. 2419–2422.
26. *Дрейден Г.В., Зайдель А.Н., Марков В.С. и др.* Интерференционно-голографическое исследование плазмы в окрестности нейтрального токового слоя. // *Письма ЖТФ*. 1975. Т. 1. № 3. С. 141–148.



## ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ ДЕНИСЮК И ЕГО РОЛЬ В РАЗВИТИИ ГОЛОГРАФИИ В СССР И СТРАНАХ СНГ

С. Б. ГУРЕВИЧ, доктор физ.-мат. наук

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

E-mail: sbgurevich@mail.ru

Отмечается роль собственных основополагающих работ академика Ю.Н. Денисюка, его руководящей и научно-организационной деятельности, в развитии голографических исследований в научных центрах СССР и стран СНГ.

Вторая половина XX века знаменательна появлением целого ряда новых направлений в науке и технологии. Среди таких новых направлений можно указать на голографию, большая часть которой относится к оптике; однако она оказала влияние и на развитие других наук, таких как радиоэлектроника, акустика, информатика. Метод записи волнового фронта, именуемый голографией, предложил в 1949 г. Д. Габор [1], и в течение нескольких лет новое направление привлекало к себе очень небольшое внимание исследователей. Переломный момент наступил в 1962–1963 годах, когда появились две основополагающие работы. Первой из них явилась опубликованная в 1962 г. статья Юрия Николаевича Денисюка [2] “Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения”. В этой работе впервые была продемонстрирована возможность записи голограмм в трехмерных средах, что, как выяснилось позднее, имело огромное значение для плотной записи информации и для создания эффективного способа формирования объемных изображений. Второй важной работой была статья Лейта и Упатниекса [3], которые записывали голограмму, используя внеосевой опорный пучок и в качестве когерентного источника использовали недавно появившийся лазер. Эти две работы спровоцировали всплеск интереса к голографии, и в последующие годы появилось большое количество исследований в области голографии и, соответственно, публикаций.

Интерес к голографии был сразу же проявлен и в СССР. Во многих институтах, как академических, так и отраслевых, появились лаборатории или группы, в которых проводились соответствующие исследования. Здесь, как и за рубежом, было обращено внимание на широкие возможности использования голографии как методов исследования различных процессов, и для создания новых приборов. Стимулирующую роль сыграла и пионерская работа отечественного ученого – Ю.Н. Денисюка. Он сам продолжал активно развивать свои работы, которые привели его к новым открытиям. Свои первые работы он провел в Государственном оптическом ин-

ституте (ГОИ) им. С.И. Вавилова. Остановимся на некоторых моментах его творческой биографии.

Юрий Николаевич Денисюк родился 27 июля 1927 года в г. Сочи. Военные годы он провел в блокадном Ленинграде. В 1948 г. он поступил в Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО), который и закончил в 1954 году, получив по окончании диплом с отличием. С 1954 г. и до последнего времени он проработал в Государственном оптическом институте. Одновременно с 1980 по 1988 г. он был профессором в ЛИТМО. В 1988 г. он был избран заведующим лабораторией Оптоэлектроники и голографии Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе АН СССР, оставаясь им до последних дней жизни, одновременно сохраняя ведущие посты в ГОИ. Свои исследования, завершившиеся публикацией в 1962 г. пионерской работы в ДАН СССР, он начал в 1958 г. Целью работы было определение возможности осуществления устройств, создающих полную иллюзию изображаемых объектов. В поисках конкретного механизма, который бы обеспечил воспроизведение волновых полей, Ю.Н. Денисюк обратился к работе Липпмана 1908 г., в которой последний предложил так называемый интерференционный метод цветной фотографии. В то время (в 1959 г.) Ю.Н. не был знаком с работой Габора. Вероятно, это оказалось счастливым обстоятельством, поскольку в результате им была открыта объемная голографическая запись, сыгравшая затем огромную роль в различных применениях голографии в науке и практике. В своей нобелевской речи Д. Габор особо отметил эту работу Юрия Николаевича. Работавший в США голландский ученый Ван Хирден, также написавший о возможности объемной записи голограмм, но позднее – в 1963 г. [4], 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 – специалистов по голографии, и за рубежом была создана инициативная группа по выдвижению Ю.Н. Денисюка и Э. Лейта на Нобелевскую премию. Работы последних иници-

ровали поток новых исследований в области голографии. Активно способствовал развитию этих работ вице-президент АН СССР акад. 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 Л.А. Арцимович выдвинул кандидатуру Ю.Н. Денисюка для баллотировки в чл.-корр. 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. за цикл работ “Голография с записью в трехмерных средах” ему 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, оставаясь заведующим лабораторией, которой он руководил раньше. 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. В последующие годы Ю.Н. Денисюк продолжает активные исследования в области основ голографии и ее практических применений. Им было показано, что отображающими свойствами обладают и бегущие волны интенсивности, возникающие в том случае, когда частоты объектного и опорных пучков различны. В результате возникла возможность получения изображений движущихся объектов, включая их регистрацию методами динамической голографии. За эту работу Ю.Н. Денисюк в составе коллектива авторов в 1982 г. удостоен Государственной премии СССР. В 1983 г. ему вручена награда им. Д. Габора. В 1987 г. Ю.Н. Денисюк был избран членом Королевского фотографического общества в Лондоне. Еще одна государственная премия была ему присуждена в 1989 году. В 1992 году он был избран действительным членом Российской академии наук.

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 переключившись 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-нибудь проблемы. Юрий Николаевич был тре-

бователен к себе и был в меру требовательным к своим сотрудникам. Но он очень не любил неаккуратно сделанные работы, легковесность суждений, и в этих случаях был достаточно строг.

Много сил Юрий Николаевич отдал развитию голографии в стране и воспитанию научных кадров по этому направлению. Здесь сыграло большую роль его активное участие в работе созданного в 1970 году Научного совета по проблеме “Голография” при президиуме АН СССР, на счету которого была организация более десятка конференций и около трех десятков школ. К этому времени создалась большая группа ученых в различных научных центрах, заинтересованных в контактах и разработках научных программ по использованию голографии в исследованиях и народном хозяйстве. Наряду с уже получившими широкую известность пионерскими работами Ю.Н. Денисюка, большой вклад в развитие отдельных направлений голографии внесли А.Л. Микаэлян, Ю.И. Островский, Л.Д. Бахрах и другие ученые. Инициативу по организации научного совета по проблеме “Голография” проявил вице-президент АН СССР академик Б.П. Константинов, который организовал в Физико-техническом институте им А.Ф. Иоффе специальную голографическую лабораторию, существующую до настоящего времени. Б.П. Константинов безвременно скончался 9 июля 1969 г. и совет по проблеме “Голография” возглавил чл.-корр. АН Л.Д. Бахрах, его заместителями были определены Ю.Н. Денисюк и С.Б. Гуревич, ученым секретарем – Г.А. Гаврилов. Совет дислоцировался в лаборатории Оптоэлектроники и голографии ФТИ. Было организовано бюро совета, в котором видную роль играл Ю.Н. Денисюк. В Совете были организованы четыре секции: первая секция охватывала проблемы оптической голографии, и руководил ею Ю.Н. Денисюк; вторая секция занималась вопросами оптической обработки информации – руководил ею С.Б. Гуревич. Третья секция, под руководством Л.Д. Бахраха занималась проблемами радио- и акустической голографии. Четвертая секция, сперва под руководством Н.И. Кириллова, а затем после его кончины – В.А. Барачевского – охватывала вопросы, связанные с созданием и совершенствованием сред, пригодных для голографической записи. Каждая секция выпускала свои тематические сборники трудов, в которых публиковались наиболее интересные работы по заданной тематике. Всего было выпущено более 30 таких сборников.

Важную роль в формировании плеяды молодых ученых, специализирующихся в области голографии, сыграли ежегодно проводившиеся школы. Большая организующая роль в их создании принадлежит профессору Г.В. Скроцкому. Программный

комитет, как правило, работал под руководством Ю.Н. Денисюка, который на многих школах читал свои лекции. Эта школа, проводившаяся в разных республиках и районах СССР, пользовалась большой популярностью, и на нее приезжали специалисты из разных стран Европы, из США, Канады, Китая и Японии. Фактически международными были школы по голографии в Ульяновске в 1971 году и в Новосибирске в 1973 году. На последней присутствовали и читали лекции Э. Лейт, Д. Строук, А. Ломан, У. Кок и другие известные зарубежные специалисты.

Советом по голографии были проведены 7 все-союзных голографических конференций, первая из которых состоялась в Тбилиси в мае 1972 года. Более 250 участников конференции принимал тогда грузинский Институт Кибернетики во главе с директором института В.В.Чавчанидзе. Сотрудники института к тому времени внесли уже весомый вклад в изобразительную и поляризационную голографию. Наиболее представительной была III все-союзная конференция по голографии с международным участием, проводимая в 1978 году в Ульяновске. Последняя всесоюзная конференция по голографии была проведена в 1990 году в Витебске. На этих конференциях рассматривались следующие разделы, имеющие отношение к голографии:

- схемы голографической записи;
- изобразительная голография;
- голографическая интерферометрия;
- голографическое архивное хранение данных;
- голографическое оперативное хранение информации;
- голографические и когерентные методы обработки оптической информации;
- голографическое кино и телевидение;
- голографические дисплеи и экраны;
- динамическая голография;
- техника радужных голограмм;
- синтезированные голограммы;
- цветная голография;
- голографическая микроскопия;
- голографические записывающие среды – тонкие;
- голографические записывающие среды – объемные.

Юрий Николаевич Денисюк постоянно участвовал в этих конференциях в качестве докладчика, председателя программного комитета, председателя секционных заседаний. К нему многие докладчики обращались за советами, и он оказывал им необходимую помощь.

Совет по голографии проводил также тематические конференции и школы по разным разделам голографии. Ю.Н. Денисюк руководил некоторыми из них. Он также принимал активное участие в вы-

ездных заседаниях бюро Совета, в которых обсуждались результаты научной деятельности отдельных организацией, выступая с разумной критикой и предложениями по улучшению работы.

Несмотря на большую загруженность своей научной работой, Ю.Н. Денисюк много внимания уделял своим аспирантам и руководимым им научным сотрудникам, как в ГОИ, так и позднее в ФТИ, чем ускорял получение позитивных результатов в проводимых исследованиях.

В 90-х годах минувшего столетия и в первых годах XXI века положение на территории бывшего СССР с работой как вообще в науке, так и, в частности, в голографии, осложнилось. Возможности для научных контактов и для проведения фундаментальных исследований несколько сократились. Однако активность научной и организационной деятельности Ю.Н. Денисюка, избранного в 1988 г. председателем Совета по голографии, а в 1992 академиком РАН, оставалась на высоком уровне. Руководимые им группы регулярно получали поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ). Несколько лет он вел научную школу его имени.

Его продолжали приглашать в качестве руководителя и консультанта в институты Российской Федерации, на конференции стран СНГ по голографии и смежным направлениям. Такие международные конференции особенно часто проводились в Республике Киргизстан (6 конференций), где продолжала существовать активная группа специалистов по голографии, созданная А.А. Акаевым, в прежние годы членом бюро Совета, а с 1991 г. по 2005 г. – президентом Киргизстана. Юрий Николаевич был всегда желанным гостем и советчиком на этих конференциях и в промежутке между ними. В 2000 г. он активно участвовал в международной конференции на Украине (г. Киев). В 1995 г. под его руководством был проведен Российский голографический семинар в С.-Петербурге. В последние 15 лет Юрий Николаевич часто выступал на международных конференциях во многих зарубежных странах, где его авторитет, как одного из основоположника голографии, был по-прежнему очень высок. В 90-х годах его дважды приглашали на длительный срок для проведения исследований в Колумбию (г. Богота) и в Италию (г. Комо). Результатом первой поездки было создание вместе с В.Б. Марковым и Р. Амескитой нового метода мультиплексирования голограмм с трехмерным спекл-смещением. Результатом второй поездки была публикация совместно А. Андреони, М. Бондани и М. Потенца работы “Голограмма, генерируемая второй гармоникой для сверхбыстрой обработки информации”.

Резюмируя сказанное, можно отметить, что Юрий Николаевич Денисюк внес существенный вклад в развитие голографии в СССР и странах СНГ как в результате большого количества собственных работ, включая основополагающие, так и в результате активного влияния на проведение экспериментальных и теоретических работ в различных научных центрах, проводимых другими исследователями.

Нет сомнения, что имя Юрия Николаевича Денисюка, замечательного ученого, сохранится в истории физики в качестве одного из зачинателей нового направления, человека, отдавшего всю жизнь науке.

## Литература

1. *Gabor D.* Microscopy by reconstructed wavefronts // *Proc. Roy. Soc.* 1949. V. A-197. P. 454–487.
2. *Денисюк Ю.Н.* Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // *ДАН СССР.* 1962. Т. 44. С. 1275–1278.
3. *Leith E.I. and Upatnieks J.* Wave front reconstruction with continuous tone objects // *J. Opt. Soc. Amer.* 1963. V. 53. P. 1377–1381.
4. *Van Heerden P.J.* A new optical method of storage and retrieving information // *Applied Optics.* 1963. V. 2. P. 387–392.

## ЛАБОРАТОРИЯ ГОЛОГРАФИИ ГОИ: 1968–1975 гг.

О. В. АНДРЕЕВА, канд. физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский Государственный университет точной механики и оптики  
E-mail: olga\_andreeva@mail.ru

После окончания физфака ЛГУ в 1967 году мне посчастливилось начать работу в только что организованной лаборатории голографии, руководителем которой был Ю.Н. Денисюк. Именно посчастливилось, потому что в лаборатории царил творческая деловая атмосфера, создателем которой был, естественно, ее руководитель.

Ю.Н. Денисюк создал свою лабораторию из молодых людей – выпускников оптических отделений лучших вузов нашего города – ЛЭТИ, ЛГУ, ЛИТМО, и сделал из них специалистов нового для России направления – голографии. Даже для Государственного Оптического Института (ГОИ) того времени, находящегося в самом расцвете своей научно-технической деятельности, ситуация в лаборатории была исключительная – на 15 молодых специалистов приходилось 16 научных тем. Практически каждая научная тема была связана с постановкой новых экспериментов, требующих разработки принципиально новой элементной базы, создания лабораторных макетов и устройств.

Большое внимание Юрий Николаевич уделял разработке и созданию голографических установок и оптико-механических узлов голографических



Фото 1. Ю.Н. Денисюк – начало 70-х.

схем, исследованию свойств источников излучения, а также разработке и созданию регистрирующих сред для записи голограмм.

Чрезвычайно полезной для поддержания высокого творческого и научного уровня лаборатории была система научных семинаров, которые проводились практически еженедельно. Семинары были высшей школой повышения квалификации для всех нас, работавших под руководством Юрия Николаевича. Практически каждый сотрудник, включая самых молодых, только что окончивших вуз, несколько раз в год выступал на таком семинаре, а участие в нем было обязательным для всех членов лаборатории независимо от того, занимались ли они научной работой, или выполняли технические или организационные функции.

На семинары выносились следующие вопросы.

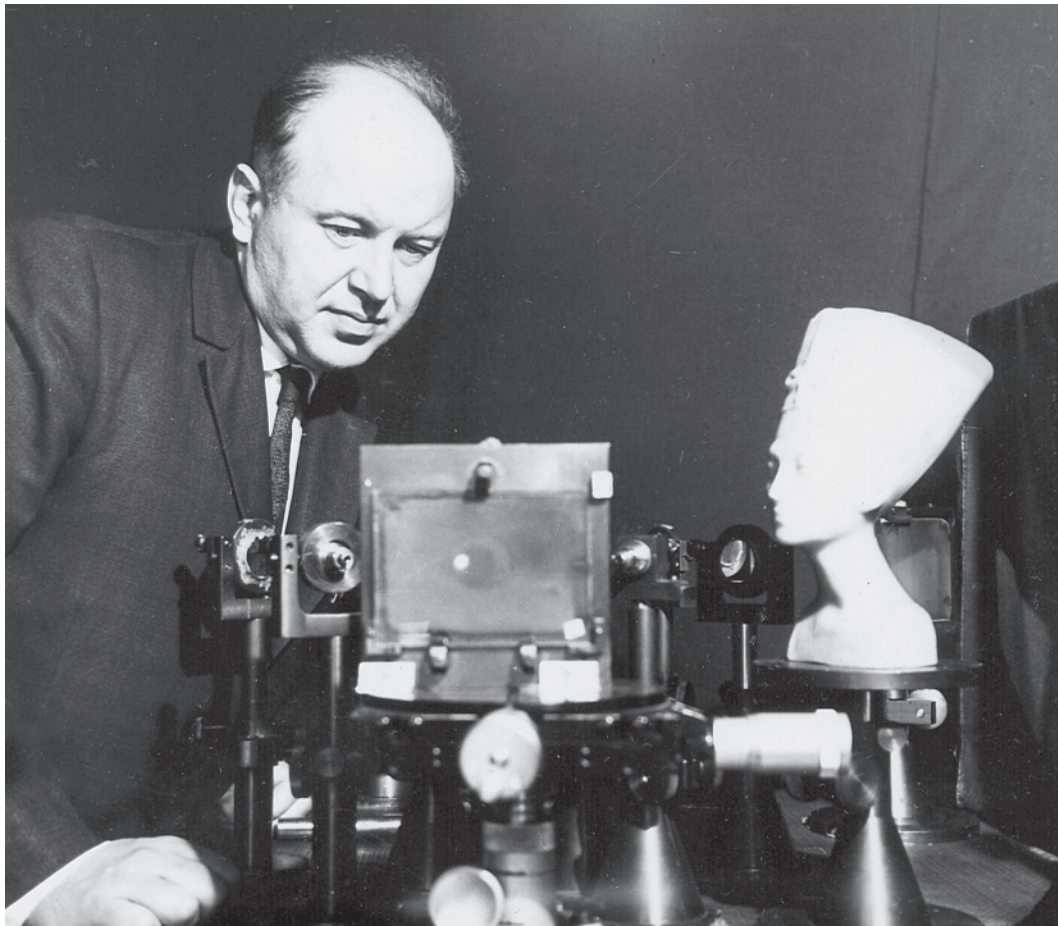
- Информация о самых свежих публикациях, имеющих отношение к голографии. Многие сотрудники лаборатории в то время работали в реферативных журналах и получали самую свежую информацию о публикациях в зарубежных изданиях еще до их появления в нашей стране (на русском языке).

- Информация о работах, которые проводились в лаборатории: каждый научно-технический отчет о законченной работе, каждая публикация сотрудников лаборатории обязательно обсуждались на семинаре. Полное одобрение работы получали не слишком часто, обычно возникали споры, высказывались замечания и пожелания. Как правило, обсуждения были бурными и темпераментными.

- Очень много внимания Юрий Николаевич уделял развитию своих идей и их дальнейшему продвижению: на семинарах довольно часто присутствовали и выступали представители самых разных организаций из регионов России и всего Советского Союза, многим из которых он помогал развивать свои работы, помогал защитить диссертацию, правильно сориентироваться в существующей обстановке.

Атмосфера семинаров всегда была исключительно доброжелательной, творческой. Юрий Николаевич как руководитель семинара всегда поддерживал инициативу сотрудников и очень внимательно и бережно относился к тем мнениям, которые высказывали участники семинаров по существу обсуж-





**Фото 2.** Ю.Н. Денисюк у установки для съемки изобразительных голограмм. Начало 70-х.

даемой проблемы, даже если это мнение противоречило общепринятым представлениям. Он всегда ценил и поддерживал тех, кто высказывал оригинальные идеи, творчески относился к работе, а самое главное, как я уже сейчас понимаю, он ценил преданность науке, потому что сам был именно таким человеком.

Мы, молодые специалисты того счастливого времени нашей лаборатории, нашей голографии, бесконечно ценили и обожали Юрия Николаевича. Все без исключения работали чрезвычайно энергично и самозабвенно. Юрий Николаевич всегда был для нас непререкаемым авторитетом, хотя он никогда не повышал голоса на сотрудников, не ругал за мелкие недочеты, оплошности, нарушения дисциплины. При большой строгости порядков в ГОИ того времени он по мере сил защищал сотрудников от излишней строгости более высокого начальства. Мы всегда ощущали его уважение к тем, с кем он имел дело, независимо от возраста – всегда и во всем!

Кроме очень яркой и самобытной системы научных семинаров, у нашей лаборатории была еще одна отличительная особенность. Для всех сотрудников своей лаборатории Юрий Николаевич установил довольно жесткий распорядок дня, который про-

держался довольно долгое время. В 8.30 начинался рабочий день для всех сотрудников ГОИ. Рабочее время с 8.30 до 11.00 для сотрудников нашей лаборатории было посвящено работе за письменным столом: написание отчетов, чтение литературы и т. д. Никаких разговоров, обсуждений, экспериментов в это время не допускалось – сам Юрий Николаевич строго следил за соблюдением тишины и порядка в это время, и сам его продуктивно использовал для своей работы. Сотрудники лаборатории размещались в то время в трех офисных комнатах, и Юрий Николаевич сидел в комнате, где находилось еще 6 человек, поэтому выделение времени для сосредоточенной работы за письменным столом было очень полезным.

Творческая энергия нашей лаборатории была не совсем рядовым явлением. Тем не менее, в ГОИ было много научных коллективов, занимавшихся фундаментальными поисковыми исследованиями, которые работали энергично, успешно, творчески и продуктивно. Это был тот высокий научно-технический уровень, который позволял выполнять оригинальные научно-технические разработки с привлечением высококвалифицированных специалистов из разных областей знаний внутри одного

предприятия. В лаборатории проводилось много совместных работ: над голографическими проблемами и их решением ломали головы специалисты различных подразделений ГОИ. В первую очередь, такие контакты были в области исследования фоторегистрирующих сред, лазерных источников излучения, при разработке оптико-механических узлов и элементов голографических схем; при создании новых светочувствительных материалов, ориентированных на голографический метод записи информации.

Творческая энергия молодой лаборатории определяла стиль проведения не только научных семинаров, но и семинаров-праздников. В праздничные дни готовили большие капустники и представления. Особенно любили отмечать Новый год, “Мужской день – 23 февраля” и “Женский день – 8 марта”: стихи, песни, плакаты, спектакли, в которых участвовали все сотрудники. Юрий Николаевич далеко не всегда принимал участие в таких мероприятиях, но всегда держался очень скромно и ни в коем случае не ограничивал инициативу. Любимая тема того времени: наша лаборатория – корабль с прекрасным именем “ГОЛОГРАФИЯ”, Юрий Николаевич – капитан, ведущий корабль в неизвестное, но счастливое будущее через бури и штормы мирового океана.

Эти воспоминания написаны в то время, когда все мы, знавшие Юрия Николаевича и работавшие с ним в разные периоды его деятельности, остро переживали горечь утраты. Научное наследие Ю.Н. Денисюка и его вклад в развитие мировой науки и науки в России в настоящее время очень



**Фото 3.** Фрагмент стенгазеты лаборатории 23 февраля (начало 70-х).

высоко оценены научным сообществом. Несомненно, что существенное значение имеет и личность Юрия Николаевича, его огромное влияние на тот коллектив, которым он руководил, и на тех людей, с которыми он общался: его преданность науке, бескомпромиссность в решении принципиальных вопросов, его доброжелательное и поддерживающее внимание к тем, кто творчески и инициативно занимается научной деятельностью, близкой интересам самого Юрия Николаевича.

## НАУЧНЫЕ ШКОЛЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА И Ю. Н. ДЕНИСЮК

*Т. С. ЮДОВИНА*

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий механики и оптики  
(СПб ГУ ИТМО)

В докладе рассматривается десятилетний период научной работы (1954–1964) Ю.Н. Денисюка на фоне научных школ Государственного Оптического Института (ГОИ).

“Безумье – и благоразумье, позор – и честь,  
Все, что наводит на раздумье, все слишком есть”.

*М. Цветаева*

Основные положения доклада были изложены 27 июня 1997 г. на пленарном заседании ежегодной конференции в Институте истории техники и естествознания РАН “Санкт-Петербург – научный центр России”. В этот день Юрию Николаевичу – основателю научной школы голографии в России, исполнилось 70 лет. Это обстоятельство вполне оправдывало представление моего доклада. Ясно, что в рамках одного доклада невозможно всесторонне обсудить столь объемную тему.

Юбилей Ю.Н. Денисюка дал повод остановиться на одном – может быть, не очень “юбилейном” – аспекте заявленной темы. Дело в том, что Ю.Н. Денисюк – один из последних академиков, “родившихся” в Оптическом институте. Научная школа голографии – одна из самых “молодых” научных школ ГОИ, наряду со школой Е.Б. Александрова, если и может быть сегодня включена в список существующих в ГОИ научных школ, то с оговоркой, что центр тяжести деятельности ее основателя был в последние годы перенесен в ФТИ РАН (опять же, как и деятельность Е.Б. Александрова).

История жизни научных школ неизбежно рождает ассоциацию с живыми существами – они рождаются, развиваются, взаимодействуют с другими школами, порождают новые школы. Активность научной школы может затухать вплоть до исчезновения, “смерти” конкретной школы. Научные школы в таком комплексном научном учреждении, как ГОИ, сама их жизнь, зависят от многих факторов. Очень большое значение имеет личность научного руководителя ГОИ.

Представляется интересным проанализировать некоторые особенности развития научных школ ГОИ, намеренно ограничившись периодом до 1964 г. – года, в который Ю.Н. Денисюк защитил кандидатскую диссертацию.

Намеренный отказ от анализа “новейшего периода” истории научных школ ГОИ отнюдь не противоречит теме доклада.

К 1964 году, т. е. за 46 лет существования ГОИ, в силу разных причин его стены покинули 13 членов Академии наук и великое, к сожалению, точно не зафиксированное, число менее именитых, но, безусловно, выдающихся ученых.



Академик

**Дмитрий Сергеевич РОЖДЕСТВЕНСКИЙ**  
(1876–1940)

Организатор, директор и научный руководитель ГОИ (1918–1932). Имя Д.С. Рождественского присвоено Оптическому обществу (1990) – преемнику Русского Оптического общества, организованного по его инициативе в 1922 г. АН СССР утверждена премия имени Д.С. Рождественского за лучшие работы по оптике.



Начало ГОИ – это Дмитрий Сергеевич Рождественский, профессор Петербургского университета, реформатор образования физиков, основатель научной школы оптиков. Среди его учеников – ученый секретарь Палаты мер и весов Л.Д. Исаков, профессор Петроградского университета В.М. Чулановский, академики И.В. Обреимов, А.А. Лебедев, А.Н. Теренин, В.А. Фок, члены-корреспонденты С.Э. Фриш, Е.Ф. Гросс.

25 сентября 1915 г. Рождественский был приглашен консультантом по производству оптического стекла на Императорский Фарфоровый завод. Это приглашение стало отправной точкой для создания нового направления работ в растущей научной школе Рождественского.

Мало кто знает, что стекло, пригодное для изготовления оптических приборов, представляет собой удивительное по своей однородности вещество, производство которого является очень трудной технической задачей.

Позднее Рождественский скажет: “Физик – даже ученый-оптик – зачастую не знает свойств оптического стекла и требований, к нему предъявляемых. Но он может легко познакомиться с этими вопросами, и только он может правильно и до конца уяснить их себе и увидеть вещи в настоящем масштабе” [1].

Д.С. Рождественскому принадлежат классические труды по аномальной дисперсии в парах металлов. Труды по теории атомных спектров и строению атомов поставили его работы в один ряд с наиболее выдающимися исследованиями XX века.

Рождественский умел создавать большие творческие коллективы и руководить ими, видеть первостепенные задачи и намечать пути их решения. Решить стекольный вопрос ему помогли, с одной стороны, известные ученые В.А. Тищенко, В.К. Грум-Гржимайло, Н.С. Курнаков, И.В. Гребенщиков, Н.Н. Качалов, А.И. Тудоровский, с другой стороны – его ученики И.В. Обреимов, А.А. Лебедев.

Новым этапом в развитии научной школы Д.С. Рождественского явилось создание в 1918 году ГОИ, первым директором и научным руководителем которого он стал. ГОИ подчинялся Народному комиссариату просвещения. Значительную часть сотрудников института составляли преподаватели университета, а их помощниками были лучшие из студентов.

“С отрядным и гордым чувством мы всегда будем возвращаться к мысли, что восприимницей Оптического института была Академия наук. В мае прошлого 1918 года собственно зародился Оптический институт, и первые шаги свои делал под радужным покровом Комиссии естественных производительных сил России... Мы с глубокой благодарностью вспоминаем о той поддержке, какой обязаны Петроградскому университету. В его Фи-

зическом институте зародилась наша деятельность, и протекал первый год работы” – скажет Дмитрий Сергеевич на годичном собрании ГОИ в 1919 г. [2]. Только в 1922 году Ленинградский завод оптического стекла вошел в состав ГОИ.

О масштабе личности Дмитрия Сергеевича Рождественского как научного руководителя можно судить по размаху его деятельности. Он был аккумулятором нравственной и творческой энергии. Он притягивал лучшие, наиболее свободные и деятельные, честолюбивые и стремящиеся к наиболее полному самовыражению юные умы. В любом коллективе, которым руководил Рождественский, сотрудники всегда имели возможность рассуждать свободно, царил атмосфера внутренней свободы, достоинства, уважения и справедливости, долга и чести.

Рождественскому удалось собрать и сохранить вплоть до 1938 года в стенах ГОИ всех ведущих физиков – руководителей научных школ (НШ) оптиков СССР: Т.П. Кравца – НШ научной фотографии, В.П. Линника – НШ оплотехники, Д.Д. Максимова – НШ астрономической оптики, А.И. Тудоровского – НШ вычислительной оптики, И.В. Гребенщикова – НШ оптических материалов, С.И. Вавилова – НШ физической оптики.

Он имел смелость не быть слепо заодно с властями и отстаивал свои убеждения. Дмитрий Сергеевич Рождественский никогда не принадлежал ни к одной партии, как, впрочем, и остальные научные руководители ГОИ рассматриваемого периода: С.И. Вавилов, А.Н. Теренин, Е.Н. Царевский.

ГОИ вырос из оплотехники, и в 30-е годы половина его работ делалась по указаниям Всесоюзного Объединения ОМП. Поэтому наряду с ролью головного института он должен был принять на себя обязанности отраслевого института. Заводы отрасли стали требовать, чтобы ГОИ принимал непосредственное участие в преодолении их повсеместных трудностей, помогал создавать технологию производства. Дмитрий Сергеевич пытался доказать, что решение текущих технологических задач – дело самих заводов, а Оптический институт должен заниматься проблемами более дальнего прицела. Неполноценность в планировании научной работы и в организации ее связи с промышленностью привели к тому, что в 1932 г. Дмитрий Сергеевич решил отстраниться от административной работы.

В мае 1930 года Рождественский мог изменить судьбу института. ГОИ мог перейти в ведение Академии наук, как сделало большинство научных учреждений того времени, но Дмитрий Сергеевич решил присоединить его к ВООМПУ.

В 1937 г. директором ГОИ был назначен сотрудник ГОМЗа Д.П. Чехматаев, который потребовал

ликвидации научного отдела, не связанного с производством и занятого, под руководством Д.С. Рождественского, фундаментальной наукой.

23 октября 1938 года Дмитрий Сергеевич собирает совещание группы физики АН СССР в составе академиков А.Ф. Иоффе, А.Н. Крылова, С.И. Вавилова, членов-корреспондентов АН СССР Д.В. Скобельцына, Я.И. Френкеля, В.А. Фока, А.Н. Теренина, А.И. Алиханова. Эта группа целиком поддержала мнение Рождественского о недопустимости ликвидации научного отдела в ГОИ. Дмитрий Сергеевич обращается в вышестоящие инстанции с рядом писем. Он пишет две статьи – своеобразные планы – завещания для дальнейшей работы института – “О будущности ГОИ” и “Ближайшая будущность ГОИ”.

Когда Д.С. Рождественский убедился в тщетности своих усилий, он переходит с группой научных сотрудников в Университет. С ним уходят академик В.А. Фок, члены-корреспонденты С.Э. Фриш, Е.Ф. Гросс и Т.П. Кравец.

С 1932 по 1945 гг. научной работой ГОИ руководит преемник Д.С. Рождественского академик С.И. Вавилов. В 1932 году по предложению Рождественского в Оптическом институте была создана



Академик  
**Сергей Иванович ВАВИЛОВ**  
(1891–1951)

Научный руководитель ГОИ (1932–1945). Президент АН СССР (1945–1951). Почетный член многих академий и научных обществ. Имя С.И. Вавилова присвоено ГОИ и ИФП (1951). АН СССР учредила Золотую медаль им. С.И. Вавилова за выдающиеся работы в области физики.

лаборатория люминесценции, которую возглавил С.И. Вавилов.

Дмитрий Сергеевич и Сергей Иванович придерживались одинаковых точек зрения на судьбу и перспективы развития ГОИ и его теснейших связей с оптико-механической промышленностью.

С Вавиловым в ГОИ в разное время работали Е.М. Брумберг, Б.Я. Свешников, А.А. Шишловский, А.Н. Севченко, П.П. Феофилов, А.М. Бонч-Бруевич, Н.А. Толстой и др.

Академик А.А. Лебедев писал: “Не легко было Сергею Ивановичу отстаивать научную тематику в учреждении, к которому непрерывно обращались заводы с просьбами и требованиями оказать им срочную помощь в решении все новых и новых задач, возникающих на производстве. Нужно было обладать большим тактом и твердостью характера, умением сплачивать коллектив и руководить его работой, иметь перед собой ясную перспективу развития института и быть непреклонным при ее проведении в жизнь”.

Сергей Иванович не только сам развернул в ГОИ исследования по изучению квантовых флуктуаций света, но и энергично способствовал развитию, казалось бы, очень далеких от него работ. Начались работы по изучению стратосферы, широко развивались исследования в области светотехники, фотометрии, физиологической оптики. Все эти работы живо интересовали Сергея Ивановича. Он их опекал, стимулировал, систематически следил за ходом дел, старался помочь. Это способствовало росту его популярности и авторитета в ГОИ. Его слово всегда считалось законом.

После ухода С.И. Вавилова в Академию наук в 1945 году научным руководителем института стал ученик Д.С. Рождественского, академик с мировым именем А.Н. Теренин.

А.Н. Теренин никогда не тяготел к административной деятельности. Он никогда не забывал о своей научной деятельности, ставя ее во главу угла.

На первый взгляд, решению текущих институтских вопросов Теренин уделял мало внимания. Когда же ему указывали на это, он отшучивался: “А не беда, скорее снимут!” Однако он четко разделял важные и второстепенные вопросы и в решении всех проблем, имеющих принципиальное значение, принимал самое горячее участие.

Он стал инициатором научных чтений имени академика Рождественского, на котором докладывались лучшие работы института.

Институт рос, ежегодно приходили молодые специалисты, главным образом из университета, ЛЭТИ и ЛИТМО.

Среди молодых специалистов, принятых в ГОИ в 1954 году, Юрий Николаевич Денисюк.

“Доступность и доброжелательность “великих” по отношению к молодежи общеприняты. Возможность молодому специалисту получить консультации из первых рук без проблем”, – таким запомнился Ю.Н. Денисюку институт тех лет [3].

На Рождественских чтениях он слушает доклады таких корифеев, как И.В. Обреимова (о двойном лучепреломлении в орг. кристаллах), Б.С. Непорента (о происхождении сплошных спектров сложных молекул), Г.Н. Раутиана (о цветовом зрении). На научных семинарах института выступают П.П. Феофилов с сообщениями – об особенностях спектроскопии активированных кристаллов, М.М. Мирошников о зарождающемся тепловидении, В.В. Варгин – о ситаллах, А.М. Бонч-Бруевич – о многофотонных явлениях в оптике. Денисюка особенно интересуют работы М.П. Ванюкова, группа которого под неусыпным научным руководством академика А.А. Лебедева так близка к созданию лазеров, Г.П. Фаермана, в лаборатории которого колдует над созданием новых чувствительных сред И.Р. Протас.

Однако проблем в институте накопилось много и многие из них, к сожалению, роковым образом сказались на его дальнейшей судьбе.

Лучше всего иллюстрируют положение дел в институте теренинской эпохи (1945–1956 гг.) фрагменты из стенограмм двух заседаний Ученого Совета ГОИ, которые я позволю себе здесь привести.

*24 сентября 1952 года.*

А.Н. Севченко, ученик С.И. Вавилова: “В течение многих лет всегда наш отдел и наши лаборатории обвиняли в том, что они занимаются наукой ради науки. С.И. Вавилов правильно говорил, что самый легкий путь – сконструировать “макетик” прибора, сдать в вычислительный отдел, там оптику рассчитают, конструкторы сконструируют, мастерские сделают макет. В результате, какой-то приборчик получится, а сотрудника расценивают как ученого. С.И. Вавилов накануне своей смерти, в присутствии сотрудников, упрекал Теренина в том, что тот путь, который принял институт, может привести к очень печальным последствиям”.

*14 декабря 1954 года.*

А.Л. Никитин, директор ГОИ с 1950 по 1965 гг.:

“Я неоднократно слышал мнение, что Институт в области науки отстает, скатывается под угол”.

А.Н. Теренин:

“Мне ясно, что в первую очередь надо решать задачи оборонного характера”.

А.И. Тудоровский, член-корреспондент АН:

“В данном случае речь идет о так называемой “отвлеченной” науке. Главк устроил в свое время экспертизу работ Д.С. Рождественского. Вывод: работы Рождественского устарели, потеряли всякое значение, и теоретическое, и практическое. Эта фор-



Академик

**Александр Николаевич ТЕРЕНИН**

Ученик Д.С. Рождественского, научный руководитель ГОИ (1945–1956). Почетный член многих академий и научных обществ.

мула и лицо, которое эту формулу сформулировало, существует. И по другим работам были такие формулы. Был момент, когда институту было сказано: “литературная работа напечатанная – не результат работы. Результат работы – прибор. Эта формула приводилась в жизнь человеком инженерного склада, Чехматаевым. Это было спущено сверху, и Институт был превращен в приборостроительный. В итоге академик Рождественский был поставлен в такие условия, что ушел в Университет. У меня было много разговоров с Дмитрием Сергеевичем. Один из них был таким: “Если Вы хотите сохранить оптику, которую Вы создали, уходите сейчас же или в Академию наук или в Университет”. Это им было сказано за год-два до его ухода. За эти два года Рождественский был поставлен в такие условия, что продолжать работу в институте не смог.

Вавилов умел в той обстановке создать атмосферу, в которой можно было продолжать заниматься делом, в то же время удовлетворять тем требованиям, которые предъявляли извне. Как курьез напомним, что лаборатория люминесценции была переименована в лабораторию люминесцентного анализа, чтобы не звучала “отвлеченно”.

Я думаю, что практика терпит сейчас ущерб, т. к. те люди, которые должны решать практические задачи, должны иметь широкие теоретические знания. Они должны знать состояние науки в целом. Этих знаний у большинства нет. Для этого нужны специалисты. Специалисты с широким кругозором. Алек-



сандр Николаевич владеет кругозором, но в определенной области.

Говорили о радиоспектроскопии. Совсем новая область, я чувствую – важная и исключительно интересная. Что сделано у нас в ГОИ? Правда, под давлением, Г.Г. Неуймин начал заниматься радиоспектроскопией. Увлёкся. Его сняли, потому что пришла ответственная прикладная работа. Гелий Григорьевич имеет хорошую голову. Его надо вернуть! Можно ли институт винить за такую ошибку? И сажать Неуймина везде за все, потому что он везде может работать и всем заниматься? А такое положение не раз было в институте.

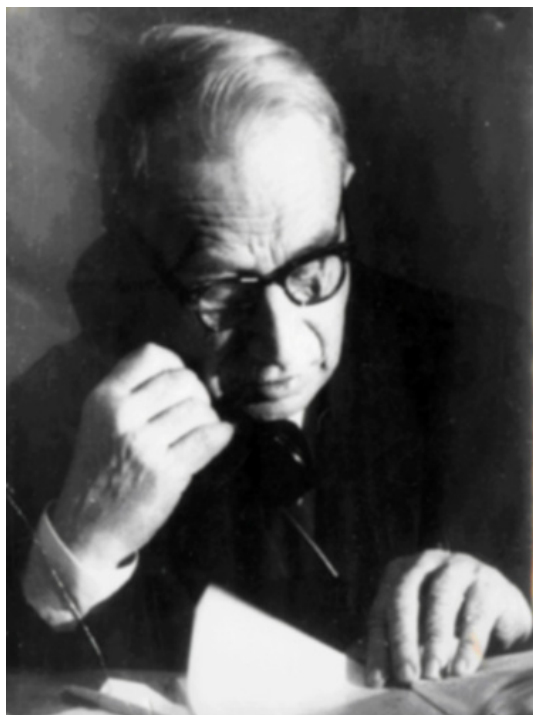
Вот здесь порог. Получается так, что нельзя, чтобы человек спокойно работал без поездок на заводы, в Москву, а потом результаты применил. А по существу дела наоборот, надо изучать и решать научные вопросы, только после этого станет возможным решение практических вопросов.

А.Л. Никитин: Так мы не под гору едем?

А.Н. Теренин: Нет.

А.Н. Тудоровский: Мы в другой плоскости движемся” [4].

В институте возникает несколько новых лабораторий и отделов, однако нарушается тесная связь между научными подразделениями, и как следствие



**Евгений Николаевич ЦАРЕВСКИЙ**  
(1904–1995)

Доктор технических наук, профессор, ученик Д.С. Рождественского, научный руководитель ГОИ (1956–1981).



**Гелий Григорьевич НЕУЙМИН**  
(1910–1982)

Доктор физ.-мат. наук. По приглашению академика А.Н. Теренина работал в ГОИ с 1931 по 1957 гг.

этого, работы начинают дублироваться. Увеличивается объем оборонных заказов.

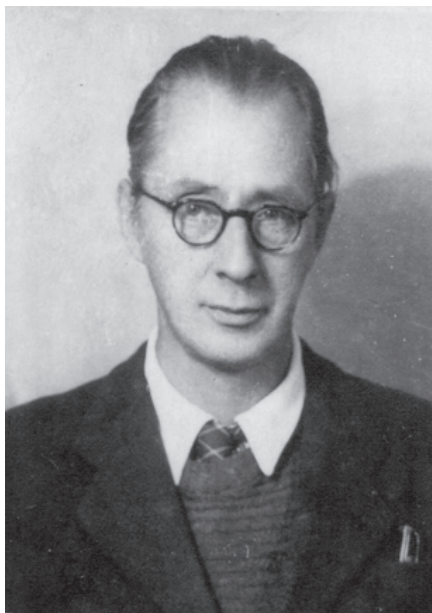
В теренинский период институт покидает академик И.В. Гребенщиков, уезжают в Белоруссию М.А. Ельяшевич, А.Н. Севченко, Б.И. Степанов, В.Г. Вафиади – будущие академики Белорусской АН.

Институт попал под жернова Всесоюзного эксперимента. ГОИ остался без серьезной опытной базы, промышленность – без научного института.

В 1956–1981 гг. в институте наступает эра еще одного ученика Дмитрия Сергеевича – Евгения Николаевича Царевского – оптотехника, доктора технических наук, талантливого организатора науки и производства.

В этот период усилилась значимость Ученого Совета института при принятии решений по перспективным планам ГОИ. Но институт все сильнее прибирал к рукам ВПК. Порядка 80% финансирования составляли работы по оборонной тематике. Правда, иногда удавалось до 30% средств от этой суммы направить на развитие фундаментальных исследований. Денег хватало. Но ГОИ оказывалось год от года все в большей изоляции от мирового научного сообщества. Единицы ГОИвских ученых, оказавшись за рубежом, вынуждены были представляться либо сотрудниками ЛГУ, либо работниками ГКНТ. Встречаться с иностранным ученым на родной земле было не менее трудно.

В 1957 г., проработав три года в лаборатории Гелия Григорьевича Неуймина – удивительно интересного человека, за которым, как вы поняли из уже сказанного ранее, в институте водилась слава уче-



**Евгений Федорович ЮДИН**  
(1894–1961)

Кандидат физ.-мат. наук, ученик Д.С. Рождественского. Работал в ГОИ по приглашению Д.С. Рождественского с 1918 г.



**Ива Рувимовна ПРОТАС**  
(1904–1976)

Кандидат хим. наук. В ГОИ по приглашению академика Д.С. Рождественского с 1930 г.

ного, у которого все получается, Ю.Н. Денисюк поступил в аспирантуру ГОИ.

Гелий Григорьевич в течение 20 лет занимался исследованиями в области молекулярной спектроскопии и фотохимии. Затем область его научных интересов была резко переориентирована на электронику, спектроскопию ультракоротких радиоволн, авиационные военные приборы. Будущий академик в лаборатории Неуймина разрабатывает и исследует оптику астронавигационных приборов под руководством Е.Ф. Юдина. Результаты его работ этого периода изложены в двух статьях и трех изобретениях.

Темой его диссертационной работы “Об отображении оптических свойств объектов в волновом поле рассеянного им излучения” руководил Евгений Федорович Юдин – один из пионеров оптотехники, ученик академика Рождественского. “Евгений Федорович был настоящим русским интеллигентом. Он, нам казалось, знал все”, – вспоминал Юрий Николаевич.

Денисюк сутками занят эмульсионными проблемами, о том, что он успевал сделать за день, можно судить по записям в его рабочих дневниках:

*“9 сентября 1960 г.*

1. Дописать заявку на открытие.
2. Разработать теорию процесса.
3. Написать статью о липпман. эмульсии.
4. Снять спектральные характеристики слоя.
5. Наладить электросхему для спектр. характеристик.

6. Описать эту схему и монохроматор.
7. Снять фотограф. характеристики толстослойных эмульсий...
10. Достать у Бурмистрова объектив” [5].

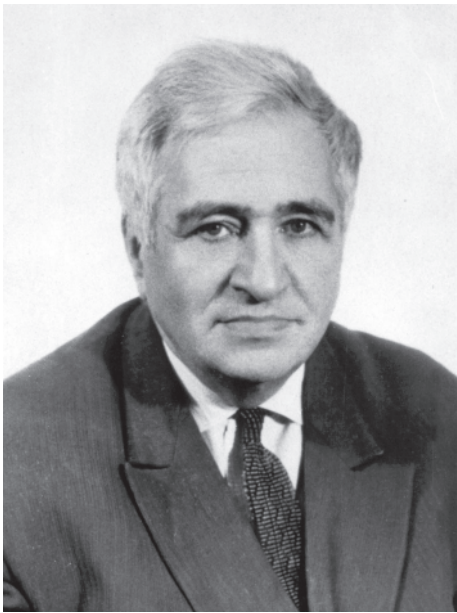
Неоценимую помощь ему оказали ученые из отдела научной фотографии Ю.Н. Гороховский, Кракау, Ф.Л. Бурмистров, И.Р. Протас. Юрий Николаевич



Академик  
**Владимир Павлович ЛИННИК**  
(1889–1984).

Лидер научной школы оптотехников. В ГОИ по приглашению Д.С. Рождественского с 1926 г.





**Давид Юделевич ГАЛЬПЕРН**  
(1912–1972)

Доктор технических наук. В ГОИ по приглашению член-корр. А.И. Тудоровского с 1935 г.



**Александр Ефимович ЕЛЬКИН**  
(1912–1979)

Доктор технических наук. В ГОИ по приглашению академика В.П. Линника с 1933 г.

вич Денисюк особенно тепло всегда вспоминал Иву Рувимовну Протас.

В 1962 году в журнале “Доклады Академии наук” была опубликована статья Ю.Н. Денисюка по теме диссертации. Представлял автора академик В.П. Линник.

Одновременно было заявлено о регистрации открытия. Но открытие в то время не было признано, т. к. мнения ученых разошлись. Одни говорили, что метод, предложенный Денисюком, не отличается от метода цветной фотографии Липпмана, другие – от метода Габора, третьи – вообще не видели в исследованиях ничего принципиально нового.

В световой оптике изображения объектов привыкли получать с помощью оптических систем. Денисюк исследовал второй возможный путь образования изображения – получение волновых фотографий объекта в поле рассеянного им излучения. Явление, при котором излучение обнаруживает способность образовывать изображения материальных тел. Это вызывало исключительный интерес и недоверие одновременно.

“Я не сразу разобрался с денисюковскими премудростями. Он толковый ученый. Чем-то всегдашней убежденностью в правоте своего дела он мне напоминает В.А. Фока. С ним трудно, как с каждой личностью такой величины, без него ГОИ мельчает”, – признался как-то в разговоре со мной Е.Н. Царевский.

Юрий Николаевич отстаивал свою работу в ГОИ. В Институте физики в Минске его поддержал ака-

демик Б.И. Степанов. На двухчасовом семинаре в Институте физических проблем Денисюк находит понимание академика П.Л. Капицы.

Защита кандидатской диссертации Ю.Н. Денисюком состоялась 8 мая 1964 года в ГОИ. Официальными оппонентами были академик И.В. Обреимов, доктора наук Д.С. Волосов и Д.Ю. Гальперн. В лице головной организации выступал московский Институт физических проблем им. С.И. Вавилова. Защита прошла успешно: из 26 членов Совета 23 проголосовали “за”.

В своем отзыве официальный оппонент академик И.В. Обреимов писал: “Что обращает на себя внимание при чтении диссертации Ю.Н. Денисюка – это ее оригинальность... Он начал новую главу в оптотехнике” [6].

В 1964 году Денисюк утверждал, что открытое им явление “найдет свое применение при получении фотокопий оптических деталей и изготовлении диспергирующих элементов, оно поможет осуществить звукооптические, радиооптические, рентгенооптические преобразования в ультразвуковой дефектоскопии, гидролокации, радиолокации, рентгеноструктурном и электроноструктурном анализе, оно открывает принципиальные возможности создания изобразительной техники”. Он убежденно доказывал перспективность своего открытия, особенно с началом лазерной эпохи. Его первые голограммы были записаны с помощью ртутной лампы.

Испытание временем оказалось здесь лучшим судьей.



16 июля 1970 г. Смольный. Ю.Н. Денисюк с женой Галиной Васильевной.

Оригинальные идеи Денисюка выходили за пределы проторенных дорог в оптике. Даже через несколько лет после защиты диссертации Ю.Н. Денисюком, в Комитете по Ленинским и Государственным премиям, где рассматривались его работы, шли серьезные дебаты.



16 июля 1970 г. Ленинград, Смольный.  
Вручение Ю.Н. Денисюку Ленинской премии.

В 1970 году Комитет по открытиям и изобретениям СССР зарегистрировал открытие Ю.Н. Денисюка трехмерной голографии. В том же году ему была присуждена Ленинская премия.

Открытие Денисюка в стенах ГОИ в 60-е годы и по субъективным, и по объективным соображениям закономерно, как закономерно и сегодняшнее положение дел, но это уже тема для другого доклада.

В Трудах ГОИ за 1969 г. [7] в своей статье “Голография с записью в трехмерных и двумерных средах” Юрий Николаевич написал: “В заключение разрешите воспользоваться случаем и поблагодарить академиков В.П. Линника, И.В. Обреимова, П.Л. Капицу, а также А.Е. Елькина за существенную поддержку, которую они оказали автору в весьма сложных условиях. Из общения с этими людьми автор вынес заключение, что отличительной чертой истинного ученого является не угасающий с годами большой и искренний интерес ко всем явлениям природы и общества, в том числе и к таким, которые лежат далеко за пределами выбранной специальности. Этим свойствам в полной мере обладал и основатель нашего института Д.С. Рождественский”.

#### Литература

1. Собрание трудов Д.С. Рождественского, АН СССР, 1949 г. С. 599.
2. Труды ГОИ, 1921 г. Т. 1, выпуск 1–6, С. 4.
3. Архив АНИ ИТМО, фонд Ю.Н. Денисюка.
4. Архив АНИ ИТМО, фонд А.Н. Теренина.
5. Архив АНИ ИТМО, фонд Ю.Н. Денисюка.
6. Архив АНИ ИТМО, фонд Ю.Н. Денисюка.
7. Труды ГОИ 1969 г. Т. 36, выпуск 165, С. 131.

## Ю. Н. ДЕНИСЮК И РАДИОЛАКАТОР С ИСКУССТВЕННЫМ РАСКРЫВОМ

Г. Б. СЕМЕНОВ

Юрий Николаевич пришел к идее регистрации трехмерного изображения на голограмме через научную фантастику. Он рассказывал об этом в нашей лаборатории.

Мое знакомство с Юрием Николаевичем состоялось в 1962 году, когда я поступил в его лабораторию после окончания ВУЗа. В этот момент времени лаборатория только создавалась и состояла в основном из молодых сотрудников. В лаборатории проводились исследования в области лазерной и инфракрасной техники. Юрию Николаевичу тогда было 35 лет.

В лаборатории регулярно проводились семинары как по собственным работам, выполненным сотрудниками лаборатории, так и по другим работам, в основном, близким к тематике нашей лаборатории. В 1964 году Ю.Н. Денисюк защитил кандидатскую диссертацию по голографии, и тематика работ лаборатории стала существенно развиваться в сторону голографии. Одной из первых работ по этому направлению стала работа в области радиолокаторов с искусственным раскрывом, в которой мне посчастливилось принять участие вместе с Юрием Николаевичем. Для меня это была чрезвычайно полезная школа привлечения к оптической голографии, поскольку в локахторах с синтезированной антенной активно используются принципы оптической голографии, а тесное сотрудничество с Юрием Николаевичем позволило мне включиться в выполнение работ в области голографии. Впоследствии в 1989 году нам с Юрием Николаевичем и Валентину Николаевичу Веснику – сотруднику ГОИ, специалисту в области расчета оптических систем, была присуждена Государственная премия за создание оригинальной оптической системы обработки информации от локахторов с синтезированной антенной.

Принцип синтезированной антенны был сформулирован американскими учеными (Катрона с сотрудниками). Он состоял в том, чтобы существенно повысить разрешающую способность радиолокатора, установленного на самолете, за счет искусственного увеличения размеров антенны локахтора в направлении путевой дальности (см. рис. 1).

Сущность этого метода заключалась в том, чтобы когерентно накопить сигналы РЛС, отраженные от местности, и обработать их одновременно на

большом участке траектории. В этом случае на самолете-носителе устанавливается радар, работающий в импульсном режиме, приемно-передающая антенна которого повернута на угол  $90^\circ$  по отношению к вектору скорости самолета  $V_c$  (см. рис. 1). Местный гетеродин самолетной станции вырабатывает гармонические колебания строго фиксированной частоты, которыми заполняются импульсы, излучаемые через антенну радара. Отражаясь от местности, эти импульсы смешиваются с сигналами местного гетеродина с учетом фаз. Получающийся в результате смешения суммарный импульс подается на электрод, модулирующий яркость луча ЭЛТ с однострочной разверткой. По существу, как показал Юрий Николаевич, запись сигналов радара в направлении путевой дальности напоминает запись одномерной голограммы, при которой местный гетеродин выполняет, по существу, роль опорной волны, а сигналы, отраженные от местности, – роль объектной волны. В направлении наклонной дальности на фотопленке регистрировались одномерные голограммы, соответствующие различным точкам на местности. При этом роль последующей оптической обработки такой хитроумной записи сводилась к следующему. Фотопленка с многоканальной одномерной записью голограмм просвечивалась плоской волной когерентного излучения, например, из-

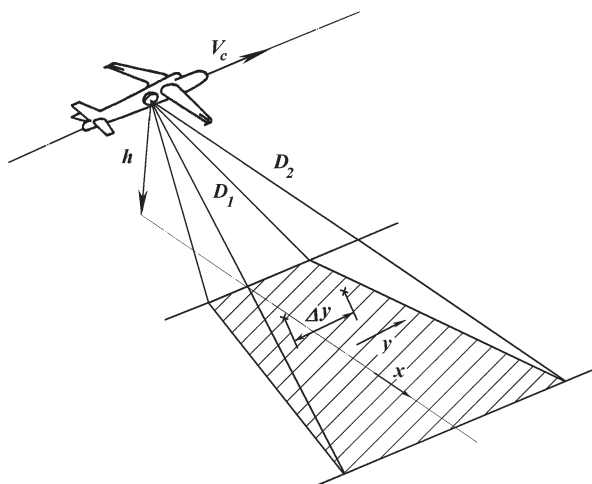


Рис. 1. Облучение полосы местности локахтором бокового обзора.



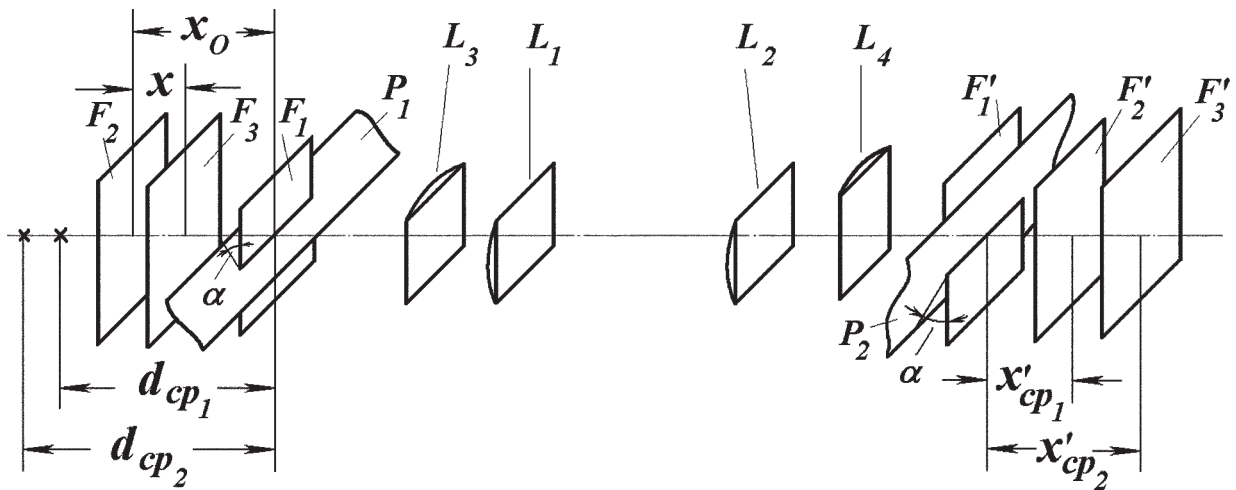


Рис. 2. Принципиальная схема анаморфотной системы с телескопическими компонентами.

лучением лазера (см. рис. 2) и с помощью оптической системы, изображенной на рис. 2, формировалось изображение местности.

На этом рисунке  $L_1$  и  $L_3$  и  $L_2$  и  $L_4$  обозначают компоненты оптических телескопических систем, формирующих изображение в двух главных взаимно перпендикулярных сечениях. При этом каждая одномерная голограмма восстанавливала изображение своего участка местности и эти изображения совместно формировали изображение местности, которая регистрировалась на фотопленке. Разрешающая способность в направлении путевой дальности ограничивалась протяженностью участка местности, который восстанавливался одновременно, а в направлении наклонной дальности – длительностью импульса локатора.

При восстановлении изображения таким способом возникала существенная проблема непостоянства масштаба изображения разных участков

местности, поскольку эти участки располагались на разных расстояниях от фотопленки, на которой регистрировалось изображение местности. В результате разные участки восстановленного изображения местности перемещались с различными скоростями относительно фотопленки и изображение в целом не могло быть зарегистрировано на движущуюся фотопленку.

Мы с Юрием Николаевичем предложили использовать для формирования изображения местности телескопическую систему, поскольку в такой системе увеличение остается постоянным для всех участков местности. В результате в такой оптической системе все фрагменты изображения двигались с постоянной скоростью, и изображение в целом можно было регистрировать на движущуюся фотопленку. При этом удавалось реализовать режим некогерентного накопления сигнала с той же скоростью, что и изображение, которое на ней регистрируется.



## ОБЪЕМНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ И КОГЕРЕНТНОСТЬ

*Н. Г. ВЛАСОВ*

В 1966 году я закончил МИФИ по специализации физика элементарных частиц и собирался посвятить этой тематике всю свою научную жизнь. Мои планы резко изменились, когда я увидел трехмерное изображение, восстановленное голограммой, записанной по методу Ю.Н. Денисюка. Объемность, параллакс, сходство с оригиналом были такими поразительными и завораживающими, что я решил поменять свою научную специальность. Вероятно, такое впечатление голография произвела не только на меня – в годы ее бурного развития и становления ей занималось непропорционально много, по сравнению с другими науками, исследователей.

Вскоре я познакомился с Л.Н. Сороко и Г.В. Скродским, стал посещать их семинары в МФТИ и читать основополагающие статьи Д. Габора, Ю.Н. Денисюка и Е. Лейта.

Особенно поразили меня первые работы Юрия Николаевича. Помимо постановки и решения конкретной задачи записи и восстановления волнового фронта, открывавшей новое научное направление, в них присутствовал одновременно и некоторый философский оттенок. Кроме того, в них намечались пути дальнейшего развития голографии, были угаданы основные области ее научно-технического применения.

После поступления в аспирантуру я решил подробнее проработать идею Ю.Н. Денисюка о возможности получения голографических оптических элементов. Как пример реализации такой идеи, в работах Юрия Николаевича описывалось получение зонной пластинки в результате интерференции плоской и сферической волн. Почему о зонной пластинке всегда рассказывают в курсе общей физики, но она практически не применяется на практике? – подумал я. Наверное, потому, что для построения изображения необходимо преобразовать сферическую волну, расходящуюся от каждой точки освещенного объекта, в сходящуюся. Зонная же пластинка преобразует друг в друга без aberrаций лишь плоские и сферические волны. Естественный вывод заключался в том, что голографические (дифракционные) элементы следует создавать при помощи интерференции расходящейся и сходящейся сферических волн. Эта простая идея оказалась достаточно плодотворной, и вскоре я получил голограмму-линзу, обладавшую дифракционным разрешением, голограмму-интерферометр сдвига и голограмму-мультипликатор. Эти результаты были успешно до-

ложены на международном конгрессе по оптике (Безансон 1970 г.), опубликованы в трудах этого конгресса и в “Квантовой электронике” (1972 г.). И до сих пор дифракционная оптика – успешно развивающееся научно-техническое направление.

Примерно в это же время я с интересом прочел в УФН обзор В.И. Слыша по радиоинтерферометрам, работа которых была основана на корреляции волновых полей по интенсивности. Вскоре я получил аналог такой интерференции в видимом диапазоне и направил соответствующую статью в журнал “Техника и приборы эксперимента”. Рецензент дал отрицательный отзыв, мотивированный тем, что без опорного волнового поля получить интерференционную картину невозможно. Огорченный, я переслал эту работу в “Оптику и спектроскопию” и получил отзыв, в котором было сказано, что статью не следует публиковать в связи с ее очевидностью. Более благосклонным оказалось ВНИИ Патентной экспертизы, выдавшее авторские свидетельства на следовавшие из этой статьи основные методы спеклинтерферометрии. Эти методы удалось вскоре опубликовать, однако приоритет на первую работу в данном направлении был потерян.

После защиты в 1972 году кандидатской диссертации я на некоторое время вернулся к изобразительной голографии. Толчком послужил разговор с Ю.Н. Денисюком, сетовавшим на то, что его голограммы не удается копировать в связи с усадкой фотоэмульсии. До поступления в институт я несколько лет проработал в фотоцехе типографии и неплохо разбирался в фотохимии. Я попробовал обработать фотопластинки в двух представлявшихся перспективными вариантах и в обоих случаях эксперимент удался (“Оптика и спектроскопия”, 1981 г.). После этого стало возможным получать голографические изображения, пересекающие плоскость регистрирующей среды или расположенные перед нею.

В 1975 году в “Scientific American” был опубликован обзор Е. Лейта, в котором подробно описывалась развиваемая С. Бентоном радужная голография. Для упрощения его двухступенчатого метода и устранения возникающих при этом шумов, затрудняющих тиражирование голограмм, я сразу же предложил одноступенчатый метод их записи для отражающих и фазовых объектов, а также способ создания многоцветных радужных голограмм в излучении одного монохроматического лазера. При

изменении направления наблюдения в вертикальном направлении каждый цвет такого многоцветного изображения непрерывно изменялся, что представляло собою необычное и привлекательное зрелище. С заметной задержкой соответствующая статья в соавторстве с Р.В. Рябовой и С.П. Семеновым была опубликована в “Журнале научной и прикладной фотографии” (1977 г.) и в более подробном изложении в Школе по голографии (1978 г.).

После первых классических работ Ю.Н. Денисюка на меня большое впечатление произвели его работы по исследованию когерентности, выполненные им совместно с Д.И. Стаселько и В.В. Смирновым. В них было показано, что голографический процесс чрезвычайно чувствителен по отношению к конкретному составу волновых полей, при помощи которого можно определять как временную, так и пространственную когерентность.

Мне показалось интересным и перспективным изменить постановку задачи на противоположную и, управляя когерентными свойствами волновых полей, использовать когерентность как информативный параметр для решения ряда задач физической оптики, оптико-физических измерений и метрологии. Так, в 1979 г. совместно с Б.М. Степановым, Ю.П. Пресняковым и Р.Б. Мацонашвили мы опубликовали несколько работ, в которых докладывалось об обнаружении нового эффекта. Он заключался в том, что при определенных соотношениях между микроструктурой поверхности трехмерного объекта, когерентностью освещающего излучения и апертурой оптической системы область локализации спекл-эффекта резко сужается, повторяя форму объекта в пространстве изображений. Пользуясь терминами радиотехники, можно сказать, что информация о форме трехмерного объекта передавалась с помощью случайной несущей пространственной частоты – спекл-эффекта в низкокогерентном излучении. При фотографировании на обычные фотопластинки на негативном изображении объекта наблюдалось яркое позитивное “световое свечение”, образованное при пересечении плоскости пластинки с объемным изображением. Ожидалось, что при дальнейшем развитии объемных регистрирующих сред можно будет получать и объемное изображение целиком. Эти работы были доложены на заседании Научного совета АН СССР по проблеме “Голография”, которым руководили Ю.Н. Денисюк и Л.Д. Бахрах, получили высокую оценку и по предложению Л.М. Сороко были признаны достижением года по тематике Совета.

В продолжение обсуждаемой тематики в 1984 году на Всесоюзной конференции “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение” нами было предложено использовать частично когерентное излучение

для решения задач томографии. Затем совместно с Э.Г. Семеновым и А.Е. Штанько были предложены низкокогерентные аналоги интерференционных и теневых измерений. В первом случае роль переменной длины волны играла длина когерентности, во втором – роль диафрагмы, блокирующей нулевой порядок, играла область пространственной когерентности. Наконец, в 1994 году совместно с С.Г. Каленковым была опубликована одна из первых работ по низкокогерентной цифровой интерферометрии.

Несколько лет назад я рассказал Юрию Николаевичу, что “Оптика и спектроскопия” отвергла мою работу о том, что, объединяя методы конфокальной микроскопии с низкокогерентной интерферометрией, можно получить продольное разрешение, в несколько раз превышающее классический предел (сейчас это ни у кого не вызывает сомнения). Рецензент писал: “в отечественной науке термин продольное разрешение отсутствует, непонятно, что имеет в виду автор”. “Не расстраивайтесь, – сказал Юрий Николаевич, которому в это время было около восьмидесяти, – наверное, Вам попался пожилой рецензент, во времена молодости которого действительно не было такого понятия. Трудно с этими стариками”. По-видимому, Юрий Николаевич искренне считал, и я с ним полностью согласен, что человек, работающий на переднем фронте науки, всегда остается молодым, по крайней мере, душой.

В заключение этих кратких воспоминаний хочется искренне поблагодарить учеников и коллег Юрия Николаевича, бережно хранящих о нем память и организовавших эту конференцию.

## Литература

1. *Vlasov N.G., Soloviev E.G.* Hologram as a diffraction shearing interferometer // *Appl. de l' holographie, Compend du Sumpos. Intern.* p. 310.
2. *Власов Н.Г., Скроцкий Г.В., Мосякин Ю.С.* Фокусирующие свойства голограмм сходящихся пучков // *Квант. Электр.* 1972. № 7. С. 14–19.
3. *Власов Н.Г., Скроцкий Г.В., Мосякин Ю.С.* Голограмма как оптический элемент // *Матер. III Всесоюзн. Школы по голографии. ЛИЯФ.* 1972. С. 73–79.
4. *Власов Н.Г., Лапина Н.А., Семенов Э.Г. и др.* Интерференционное копирование голограмм Ю.Н. Денисюка // *Опт. И спектр.* 1981. Т. 50. № 4. С. 596–597.
5. *Власов Н.Г., Рябова Р.В., Семенов С.П.* О голограммах Лейта, восстанавливаемых в белом свете // *ЖНИПФИК.* 1977. № 5. С. 384–385.
6. *Власов Н.Г., Рябова Р.В., Семенов С.П.* О голограммах Лейта, восстанавливаемых в белом свете // *Матер. X Всесоюзн. Школы по голографии. Л., ЛИЯФ.* С. 42–45.

7. Власов Н.Г., Лапина Н.А., Рябова Р.В., Семенов С.П. О радужных голограммах отражающих объектов // ЖНИПФИК. 1979. № 1. С. 48–49.
8. Власов Н.Г., Мацонашвили Р.Б., Пресняков Ю.П., Степанов Б.М. О новом оптическом эффекте, обусловленном корреляционными свойствами волновых полей // Тез. Докл. III Всесоюз. Конф. “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение”. М. ВНИИОФИ. 1979. С. 232.
9. Власов Н.Г., Мацонашвили Р.Б., Пресняков Ю.П., Степанов Б.М. Спекл-эффект в пространстве предметов и изображений при частично когерентном излучении // Матер. XI Всесоюз. Школы по голографии. Л. ЛИЯФ-1979. С. 198–218.
10. Власов Н.Г., Цитович В.А. Применение частично-когерентного излучения для решения конкретных задач томографии // В сб. тезисов Всесоюз. Конф. “Фотометрия и ее метрологическое обеспечение”. М. ВНИИОФИ. 1984. С. 316.
11. Власов Н.Г., Каленков С.Г. Получение интерферограмм фазовых объектов при освещении их белым светом // ЖНИПФИК. 1999. Т. 44. № 5. С. 65–67.

## ГОЛОГРАФИЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ВО ВНИИОФИ

Г. Г. ЛЕВИН, доктор техн. наук, профессор

ФГУП “ВНИИОФИ”, г. Москва

E-mail: levin@vniiofi.ru

Приведены результаты работы по основным научным направлениям, развиваемым в лаборатории за последние годы.

В 1966 г. во ВНИИОФИ была создана лаборатория голографии и когерентной оптики во главе с кандидатом технических наук (с 1970 г. – доктором технических наук) Верой Моисеевной Гинзбург. Голография представляла собой в то время новую науку, и базы для ее развития практически не существовало.

В лаборатории были разработаны первые в стране универсальные серийные голографические установки УИГ-1, предназначенные для исследований в области голографии с импульсными лазерами – мощный одномодовый рубиновый лазер с двумя каскадами усиления и оптической скамьей для крепления держателей оптических элементов, и УИГ-2 – для исследований в области голографии с лазерами непрерывного режима работы. Эти установки выпускались серийно до 1990 г., и благодаря им развивалась голография в СССР, причем не только в крупных НИИ или на предприятиях, но и в учебных заведениях.

Под руководством В.М. Гинзбург в лаборатории, наряду с продолжающимися и расширяющимися исследованиями в области оптической голографии, начались исследования и в области неоптической голографии: в диапазоне СВЧ, ультразвуковом излучении, цифровой голографии и обработке результатов голографических измерений. Результаты первых исследований и разработок вошли в монографию “Голография. Методы и аппаратура”, выпущенную издательством “Советское радио” в 1972 г. и ставшую настольной книгой всех специалистов в этой области. Впоследствии коллективом лаборатории были изданы монографии “Оптическая голография. Практические применения”, “Голографические измерения”, “Оптическая томография”. В лаборатории развивалось также такое важное направление, как оптическая обработка информации. С 1978 г. лабораторию возглавил кандидат технических наук (с 1984 г. – доктор технических наук) Н.Г. Власов. С 1995 г. начальником лаборатории был назначен ученик В.М. Гинзбург доктор технических наук, профессор Г.Г. Левин.

В настоящее время лаборатория “Оптической томографии и голографии” является научным под-

разделением, задача которого – проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области когерентной оптики и голографии.

Основные научные и практические результаты, полученные в лаборатории, регулярно публиковались в отечественных и зарубежных журналах. За 1998–2005 гг. в лаборатории подготовлены две докторские и четыре кандидатские диссертации. Список литературы и патенты, полученные за последние 10 лет, приведены в конце статьи в хронологическом порядке.

Остановимся подробнее на основных направлениях работы лаборатории.

### Оптическая томография

*Микротомография биообъектов.* В результате многолетней работы в области оптической томографии создан прототип оптического компьютерного томографа (ОКТ) для получения изображений и измерения пространственно-временных распределений биофизических характеристик внутри живых отдельных клеток различного происхождения.

Разработаны два типа томографических интерференционных микроскопа со сканированием излучения, зондирующего неподвижный объект, работающих в проходящем и отраженном свете на базе интерференционного микроскопа Линника.

Разработан также томографический интерференционный микроскоп проходящего света с зеркальным иммерсионным конденсором. Широкий параллельный пучок монохроматического излучения, проходя через конденсор, разделяется на 10 параллельных пучков, зондирующих объект. Каждый из них имеет одинаковый угол зондирования  $77^\circ$  и различные азимутальные углы в диапазоне  $0-360^\circ$  с шагом  $36^\circ$ .

*Эмиссионная томография.* Существует большое количество объектов, при исследовании которых важно знать пространственное распределение их компонентов, обладающих различными спектральными свойствами. Такими объектами являются различные виды плазмы, пламени реактивных двигателей, форсунок, горелок и других устройств. К дру-



гим видам плазменных образований, которые широко исследуются спектральными методами, относятся искусственные ионосферные образования (ИИО). Они включают в себя облака щелочных металлов, искусственные полярные сияния, облака плазмогасящих веществ и т. п., создаются в ионосфере и околоземном космическом пространстве, и по их спектру, яркости, изменению размеров и дрейфу судят о процессах, происходящих в ионосфере Земли. В этих исследованиях представляет большой интерес пространственное распределение спектральных составляющих свечения ИИО.

В лаборатории были проведены исследования по созданию спектротомографа для изучения этих образований. Были изготовлены макеты спектротомографов для исследования пространственно-спектральной структуры плазменных струй и люминесценции природных алмазов.

В последние годы бурно развиваются методы исследования биологических микрообъектов на основе флуоресцентной микроскопии с помощью конфокального сканирующего микроспектрометра. В лаборатории был создан флуоресцентно-интерференционный микроскоп (ФИМ), в котором объединены флуоресцентный и интерференционный каналы получения изображения. Флуоресцентное изображение дает информацию о местоположении и концентрации лекарственного препарата или флуоресцентных антител в органеллах клетки, интерференционное изображение – возможность вычислить распределение показателя преломления и таким образом оценить сухую массу белка в органелле клетки. Получение и обработка обоих изображений для одной и той же клетки в динамике позволяет изучать процессы транспортирования и воздействия лекарства на органеллы клетки.

Флуоресцентно-интерференционный микроскоп был создан на основе интерференционного микроскопа МИИ-4, выпускаемого предприятием ЛОМО. Эксперименты по получению и совместной обработке флуоресцентных и интерференционных изображений проводили на культуре раковых клеток аденокарциномы гортаноглотки человека. Следующим этапом развития ФИМ будет создание на его основе спектротомографа – системы, позволяющей с помощью синтеза методов спектроскопии и томографии автоматически осуществлять пространственное разделение различных спектральных составляющих флуоресцентного изображения.

В последние годы стали активно развиваться методы флуоресцентной томографии живых макрообъектов. Однако живые объекты представляют собой сильно рассеивающую среду, и реконструкция томограмм по известным алгоритмам, основанным на инверсии Радона, невозможна. В лаборатории

разработан принципиально новый способ конфокальной сканирующей оптической системы, обеспечивающий восстановление томограмм трехмерного объекта при существенном уменьшении времени его сканирования. Принципиальная схема конфокального томографа и его основные узлы защищены патентами, действующими на территории России и стран-конкурентов.

*Когерентные осцилляции состояния молекул белка в живых клетках.* Известно, что внутренние движения белков имеют временной диапазон  $10^{-15}$ – $10^3$  с. При больших значениях времени атомы и их группы совершают движения, которые приводят к трансформациям всей молекулы в целом, что может изменить поляризуемость молекулы, т. е. ее способность менять фазу оптического излучения, взаимодействующего с ней. Это приводит к изменению показателя преломления внутриклеточных веществ.

В лаборатории велись экспериментальные исследования изменения показателя преломления вещества живой клетки (эритроцита человека) при мониторинге ее состояния в течение 1–3 ч. Измерения проводили на автоматизированном интерференционном микроскопе. Обнаружены колебания показателя преломления с амплитудой 5–10% и периодом  $10^3$ – $3 \times 10^3$  с. Предполагаем, что данные колебания в эритроците вызваны когерентными изменениями состояния молекул белка.

Для объяснения указанного явления может быть выдвинута следующая гипотеза, которая не противоречит экспериментальным данным, описанным выше.

1. Белковые молекулы обладают свойством постоянно совершать трансформации, не изменяющие ее функциональных свойств и структуры и не приводящие к денатурации. Данные изменения носят характер колебаний, период которых составляет  $10^3$ – $3 \times 10^3$  с. Эти движения в белке приводят к изменению поляризуемости молекулы белка.

2. Если бы в живой клетке данные колебания совершались хаотично, то не наблюдался бы интегральный эффект изменения показателя преломления в течение времени. Изменение этой величины без изменения числа молекул в клетке означает когерентное квазипериодическое изменение поляризуемости большей части молекул белка одного типа (в наших экспериментах молекул гемоглобина). Таким образом, наблюдается надмолекулярный порядок в клетке, т. е. своего рода биологический порядок в живом объекте.

3. Количество молекул, совершающих когерентное движение в клетке, характеризует амплитуду колебаний. Степенью когерентности определяется различие в амплитудных изменениях инкремента показателя преломления в разных экспериментах.

4. Когерентное движение белковых молекул позволяет им реагировать на любые внешние воздействия изменением периода колебаний. В результате любого внешнего воздействия, например, извлечения клетки для наблюдения, происходит фазово-частотная модуляция естественных колебаний, приходящих молекулам одного типа.

### Оптическая нанопрофилометрия

Основные задачи, которые возникают при исследовании наноструктур, связаны с определением распределения атомов в объеме, изучением наномасштабных структур на поверхности, а также изучением свойств этих структур. Бесконтактные оптические методы и средства измерений трехмерной поверхности с разрешением по глубине до долей нанометров требуются во многих областях науки, техники и производства. Например, для лазерных зеркал необходимы измерения шероховатости с погрешностью  $5\text{Å}$ . Добротность и мощность многих лазеров определяется, в первую очередь, коэффициентом отражения зеркал резонаторов.

Создание современных оптических приборов требует прецизионных измерений отклонений от плоскостности и радиусов кривизны сферических или асферических поверхностей, при этом допускаемая погрешность измерения профиля поверхности достигает десятых долей нанометра. Для анализа указанных свойств необходимы высокоточные бесконтактные оптические измерители формы (профилометры) для исследования нано-, микро- и макро рельефа поверхностей.

В лаборатории разработан параметрический ряд высокоточных оптических профилометров для бесконтактных оптических измерений трехмерных диффузно-отражающих и зеркальных поверхностей в широком диапазоне  $1\text{--}10^{-9}$  м с разрешением по глубине до нескольких нанометров. Среди них можно выделить два интерферометра-профилометра.

Профилометр ПИК-30 предназначен для оптического автоматизированного измерения трехмерного профиля поверхности зеркально-отражающих изделий. В основе прибора лежит оптическая схема интерферометра Тваймана–Грина. Автоматизированная расшифровка интерферограмм осуществляется методом дискретного фазового сдвига, вносимого опорным зеркалом, сдвигаемым пьезоэлементом. Основные технические характеристики прибора: длина волны лазерного излучения  $0,632$  мкм; диаметр измеряемых изделий не более  $30$  мм; погрешность измерения высоты профиля в долях длины волны  $\lambda/800$ ; время одного измерения не более  $2$  с; габаритные размеры,  $455\times 203\times 365$  мм.

Автоматизированный интерференционный микропрофилометр АИМ предназначен для бесконтактного автоматического измерения микрорельефа поверхности, толщины тонких пленок, а также высотных и шаговых параметров шероховатости поверхности. Прибор создан в ЛОМО на базе микроинтерферометра Линника МИИ-4М. Для автоматизации измерений реализован метод дискретного фазового сдвига при помощи управляемого от компьютера зеркала на пьезоэлементе, встроенного в опорное плечо микроинтерферометра. Интерферограммы регистрируются встроенной ПЗС-телекамерой и через устройство ввода изображения поступают в персональный компьютер, где проводится их автоматическая обработка. Для увеличения глубины измеряемого рельефа используют лазерный осветитель пространственно-некогерентного освещения. Для точного позиционирования объекта микропрофилометр снабжен двухкоординатным автоматизированным предметным столом с шаговыми двигателями, управляемым от компьютера.

Автоматизированный интерференционный микропрофилометр имеет следующие технические характеристики: максимальная измеряемая глубина рельефа  $20$  мкм; максимальная погрешность по глубине в долях длины волны  $\lambda/800$ ; разрешение в плоскости изображения  $0,5$  мкм; освещение осуществляется полупроводниковым лазером с длиной волны  $0,65$  мкм и мощностью  $5$  мВт.

### 3-D биометрия

В настоящее время бурно развиваются способы и аппаратура для бесконтактного получения трехмерных образов в самых различных областях применения – от медицины до технического моделирования и измерений характеристик криволинейной поверхности. Системы получения трехмерных образов работают в два этапа. На первом этапе объект освещается так называемым структурированным или модулированным светом. Примером такой модуляции света является освещение объекта через обыкновенную решетку. Отраженное от объекта излучение регистрируется, как правило, цифровой фото- или видеокамерой. На втором этапе полученная информация декодируется в компьютере и трехмерный образ реконструируется. Алгоритм реконструкции является достаточно сложным и, по существу, его совершенство определяет возможности всей системы получения трехмерного образа. Решение задачи получения трехмерного изображения динамического живого объекта еще далеко до своего завершения. Во всяком случае, пока ни одна из оптических фирм в мире не объявила о создании трехмерного фотоаппарата.

Наиболее близко подошли к решению указанной задачи в стоматологии при получении оптических слепков непосредственно в полости рта пациента. В настоящее время бурно развивается направление в лечении и протезировании зубов, получившее название CAD/CAM-стоматологии. Основано оно на полной автоматизации изготовления пломб, виниров и протезов. В лаборатории создана и подготовлена к серийному выпуску трехмерная интраоральная камера. Она позволяет измерять объект при импульсном освещении (длительность импульса до 1/100 с). Происходит двухракурсное освещение объекта. Погрешность реконструкции формы объекта составляет 30 мкм. Реконструкция формы в данной цифровой трехмерной фотокамере осуществляется по оригинальному алгоритму, разработанному в лаборатории. На методы и устройства для получения трехмерных изображений оформлены три патента. Данная 3-D камера вместе с программно-аппаратным комплексом и станком с ЧПУ входит в состав стоматологической реставрационной автоматизированной установки "OptikDent", которая прошла технические испытания и подготовлена к серийному выпуску.

Технические характеристики измерительной 3D-камеры: две проецирующие оптические системы с импульсной подсветкой; область измерений не менее 14×19 мм; глубина фокусировки 10 мм; время экспозиции не более 80 мс; погрешность измерения формы поверхности объекта не более 30 мкм. Разработанные методы и устройства могут лечь в основу создания системы биометрической идентификации людей по трехмерной фотографии.

## Голография

*Измерение параметров дифракционных голографических элементов.* В настоящее время голографические технологии широко используют для создания голографических защитных знаков (ГЗЗ), которые можно встретить на большинстве документов и многих видах товаров. Некоторое время назад считалось, что подделать ГЗЗ невозможно, и наличие легко различимой, яркой и красочной голограммы на товаре или документе является гарантией подлинности. Появление подделок голографических логотипов ряда известных фирм опровергло данное мнение. Производители голограмм пытаются бороться с подделками путем разработки и внедрения в ГЗЗ новых защитных признаков. Это может быть легко осуществимо, поскольку такой знак представляет собой высокотехнологичное изделие с большой информационной емкостью. Однако то, что качество поддельного ГЗЗ, как правило, существенно ниже качества оригинала, дает воз-

можность различить их по внешним визуальным признакам при наличии соответствующего методического и аппаратного обеспечения. Поэтому разработка аппаратуры, которая позволила бы регистрировать и измерять признаки, характеризующие визуальные свойства голографического знака, и обеспечивать, таким образом, контроль качества как на стадии производства, так и при экспертизе подлинности, представляется весьма актуальной.

Основным свойством ГЗЗ является то, что они создают различные, как легко видимые, так и скрытые оптические эффекты, которые проявляют себя при изменении условий освещения или смене угла наблюдения. Для измерения характерных признаков этих эффектов в лаборатории была разработана автоматизированная установка, которая не только имитирует анализ знака экспертом-наблюдателем, но и позволяет проводить измерение визуальных параметров ГЗЗ, которые эксперт оценивает лишь качественно.

Разработанная установка позволяет оператору, не являющемуся экспертом в этой области, регистрировать набор параметров, которые исчерпывающе характеризуют визуальные свойства ГЗЗ, и таким образом оценивать его качество или подлинность.

*Изготовление голограмм на фотополимерном материале.* Отражающие голограммы на фотополимерных материалах в настоящее время начинают завоевывать рынок среди нетисненых голограмм. Основные производители коммерческих фотополимерных материалов – американские фирмы Polaroid и DuPont. Фотополимерные голограммы, в отличие от голограмм на бихромированном желатине, устойчивы к атмосферным и механическим воздействиям, их можно наклеивать на любую поверхность. Фирма DuPont выпустила целую серию голографической фотополимерной пленки под названием OmniDex. Этот материал дает возможность записывать объемные фазовые голограммы с высокой дифракционной эффективностью. Процесс же проявления – "сухой", что позволяет тиражировать голограммы интерференционным копированием. Для этого фирма разработала специальную технологию и высокопроизводительную машину, отсутствие которых сдерживало широкое производство голограмм на фотополимерной пленке. Отметим также, что в настоящее время фирма DuPont уже разработала экспериментальные образцы фотополимерной пленки для записи цветных отражающих голограмм 3D-объектов с точной передачей истинных цветов.

В лаборатории была разработана собственная машина для тиражирования объемных голограмм на фотополимере. Гибкость, устойчивость к внешним воздействиям, "сухой" процесс проявки, высокая воспроизводимость характеристик позволи-

ли создать относительно простую и надежную машину для тиражирования голограмм (далее репликатор) непрерывного действия. Процесс копирования голограмм на фотополимерную пленку непрерывный. В этом основное достоинство такой технологии. Скорость копирования ограничивается мощностью лазера и шириной пленки. В машине использован Аг-лазер с длиной волны излучения 514 нм и мощностью 8 Вт при ширине пленки 25 см, производительность репликатора достигает 150 см/мин.

Репликатор имеет также системы подачи иммерсионной жидкости, обеспыливания, автоматического отключения подачи ленты. Кроме того, конструктивно предусмотрена легкость доступа к узлам и агрегатам репликатора. Использование разработанной машины для тиражирования позволяет осуществлять массовое производство объемных голограмм.

### **Рефрактометрия и поляриметрия**

В лаборатории ведутся работы по обеспечению единства измерений в области рефрактометрии и поляриметрии. В рамках этих работ в период 2000–2002 гг. был создан государственный первичный эталон единицы показателя преломления ГЭТ 138–2003. Передача размера единицы показателя преломления осуществляется в соответствии с ГОСТ 8.583–2003 “ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений показателя преломления твердых, жидких и газообразных веществ”.

В состав эталона единицы показателя преломления для твердых и жидких веществ входят следующие основные элементы:

гонометр-спектрометр с кольцевым лазером для воспроизведения и хранения единицы показателя преломления твердых и жидких веществ и передачи ее размера. Он является основным элементом и обеспечивает среднеквадратическую погрешность угловых измерений не более 0,03" и систематическую погрешность не более 0,2";

меры показателя преломления в виде трехгранных стеклянных призм из различных марок стекла и полой трехгранной призмы с набором рефрактометрических жидкостей;

климатическую камеру с активной термостабилизацией и многоканальным цифровым термометром с выносными термодатчиками (предел допускаемой погрешности измерения цифрового термометра не превышает  $\pm 2$  мК, постоянство температуры воздуха внутри камеры  $(20,0 \pm 0,1)$  °С).

Измерения показателя преломления на ГЭТ 138–2003 для твердых и жидких веществ выполняются методом наименьших отклонений в автоматическом режиме.

Государственный первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы показателя преломления: для твердых тел со средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений  $S$ , не превышающим  $1 \times 10^{-6}$  при 50 независимых измерениях, и неисключенной систематической погрешностью (НСП) и, не превышающей  $2 \times 10^{-6}$ ; для жидкостей с СКО результата измерений  $S$ , не превышающим  $5 \times 10^{-7}$  при 50 независимых измерениях, и НСП и, не превышающей  $1 \times 10^{-6}$ .

### **Обеспечение единства офтальмологических измерений**

Лаборатория имеет комплекс оптических приборов, которые дают возможность проводить технические испытания и поверку кератометров, офтальмо-рефрактометров, офтальмометров, наборов пробных очковых линз и призм, диоптриметров. В лаборатории ведутся также работы по созданию и совершенствованию локальных поверочных схем для измерений вершинной рефракции и призматического действия очковой оптики, измерений формы поверхности и показателя преломления офтальмологических изделий и т. д. Разрабатываются новые средства поверки к офтальмологическим приборам в соответствии с требованиями ИСО. Большой практический опыт сотрудников лаборатории дает возможность проводить обучение сотрудников ЦСМ России и ближнего зарубежья методам обращения с офтальмологическим оборудованием и его поверки, а также участвовать в создании справочников офтальмолога.

### **Синтез объемных изображений методом локальной лазерной деструкции в стекле**

Развитие лазерных технологий и их внедрение в различные области науки и техники позволило лазерам войти в повседневный быт человека. В то же время визуальные эффекты, которые сопровождают лазерное излучение, а также различные виды специфического воздействия его на некоторые материалы привлекли внимание дизайнеров и представителей прикладного искусства. В лаборатории разработаны методы и аппаратура синтеза объемных изображений с использованием трехмерной лазерной графики. Создание рисунка осуществляется с помощью локальной лазерной деструкции оптического стекла, позволяющей формировать точку рассеяния размером в несколько микрометров. Располагая множество таких точек по объему стекла в соответствии с формой трехмерного художественного объекта, получают целостное объемное изображение, которое можно наблюдать со всех сто-



рон. Разработка технологии изготовления таких изображений потребовала проведения целой серии экспериментальных работ по изучению процесса локальной деструкции, ее зависимости от параметров лазерного излучения, разработки методов контроля заготовок стекла большого размера и т. д. В результате в лаборатории была изготовлена установка трехмерной лазерной графики, позволяющая создавать объемное изображение в стеклянных блоках массой до 15 кг и размером до 1 м<sup>2</sup>.

### Литература

1. Булыгин Ф.В., Левин Г.Г. // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 79. № 6. С. 973.
2. Корженевич Е.Л., Левин Г.Г. // Оптика и спектроскопия. 1996. Т. 81. № 1. С. 149.
3. Левин Г.Г., Бурганский А.А. // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 83. № 6. С. 1025.
4. Levin G.G. e. a. // Proc. SPIE. 1997. V. 490. P. 2982.
5. Бурганский А.А., Левандовский А.Г., Левин Г.Г. // Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 84. № 3. С. 498.
6. Булыгин Ф.В., Левин Г.Г. // Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 84. № 6. С. 986.
7. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г. // Измерительная техника. 1998. № 10. С. 46.
8. Вишняков Г.Н. и др. // Измерительная техника. 1999. № 1. С. 46.
9. Вишняков Г.Н. и др. // Оптика и спектроскопия. 1999. Т. 87. № 3. С. 448.
10. Бурганский А.А. и др. // Измерительная техника. 1999. № 4. С. 42.
11. Пат. 2140661 РФ. / Г.Г. Левин, Г.Н. Вишняков, Ф.В. Булыгин // Изобретения. 1999. № 30.
12. Вишняков Г.Н. и др. // Клиническая лабораторная диагностика. 2000. № 4. С. 21.
13. Vishnjakov G.N. e. a. // Proc. SPIE. 2000. V. 3919. P. 62.
14. Вишняков Г.Н. и др. // Биофизика. 2001. Т. 46. Вып. 3. С. 518.
15. Булыгин Ф.В., Золотаревский Ю.М., Левина Э.Ю. // Измерительная техника. 2001. № 12. С. 23.
16. Vishnjakov G. N. e. a. // Proc. SPIE. 2001. V. 4260. P. 149.
17. Пат. 2211440 РФ / Левин Г.Г., Вишняков Г.Н. // Изобретения. Полезные модели. 2003. № 24.
18. Булыгин Ф.В. и др. // Измерительная техника. 2002. № 4. С. 62.
19. Vishnjakov G.N., Levin G.G., Loshchilov K.E. // Intern. Conf. Automation, Control and Information Technology (ACIT 2002). Novosibirsk, 2002.
20. Vishnjakov G.N. e. a. // Seventh Intern. Symp. Laser Metrology. – Novosibirsk, 9–13 September, 2002.
21. Вишняков Г.Н. и др. // Биофизика. 2002. Т. 47. № 4. С. 638.
22. Левин Г.Г., Вишняков Г.Н. // Биофизика. 2002. Т. 47. № 4. С. 659.
23. РСТ пат. WO 03/062746. / Г.Г. Левин, Г.Н. Вишняков. // Международный бюл. 31.07.03.
24. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Минаев В.Л. // Оптика и спектроскопия – 2003. Т. 95. № 1. С. 131.
25. Пат. 2232373 РФ / Г.Г. Левин, Г.Н. Вишняков, К.Е. Лошчилов. // Изобретения. Полезные модели. 2004. № 19.
26. Vishnjakov G.N., Levin G.G., Minaev V.L. // Microscopy and Analysis. 2004. V. 18. № 1. P. 19.
27. Левин Г.Г. и др. // Измерительная техника. 2004. № 4. С. 64.
28. Ковалев А.А., Сухоруков К.А. // Измерительная техника. 2004. № 4. С. 17.
29. Золотаревский Ю.М., Ковалев А.А., Левина Э.Ю. // Измерительная техника. 2004. № 6. С. 12.
30. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Корнышева С.В. Измерительная техника. – 2004. № 11. С. 3.
31. Вишняков Г.Н., Левин Г.Г., Сухоруков К.А. // Оптика и спектроскопия. 2005. Т. 99. Вып. 4. № 9. С.
32. Левин Г.Г., Булыгин Ф.В., Вишняков Г.Н. // Цитология. 2005. Т. 47. № 4. С. 348.

**ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА ОТ РОЖДЕНИЯ ДО НАШИХ ДНЕЙ**

*Г. И. ГРЕЙСУХ*, доктор техн. наук; *Е. Г. ЕЖОВ*, канд. физ.-мат. наук

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза

E-mail: grey@gasa.penza.com.ru

Дифракционными оптическими элементами (ДОЭ) в отечественной и зарубежной литературе называют оптические элементы, осуществляющие преобразование фронта падающей волны в результате дифракции света на микроструктуре элемента, выполненной на поверхности заданной формы. Классифицируют ДОЭ по типу дифракционной структуры, по форме поверхности, на которой она выполнена, по виду осуществляемого преобразования фронта волны и, наконец, по функциональному назначению. Дифракционная структура может работать на пропускание или отражение, пространственно модулируя амплитуду и/или фазу падающей на нее волны. Не претендуя на полноту, из всего многообразия типов ДОЭ и научно-технических задач, решаемых сегодня с их помощью, в настоящем обзоре мы остановимся лишь на тех, которые лежат в сфере научных интересов авторов.

Прообраз современной дифракционной линзы – амплитудная зонная пластинка – была предложена О. Френелем в начале 19-го века [1]. В 1898 г. Р. Вуд, реализовав идеи Дж. Рэлея, впервые изготовил фазоинверсную зонную пластинку [2], а в 1955 г. Г.Г. Слюсарев предложил зонную пластинку с пилообразным фазовым профилем зон [3], который сегодня отечественные и зарубежные специалисты называют киноформным. Термин “киноформная линза” введен в работах Л. Лезема и др. только в 1969 г. [4]. Дифракционная эффективность (под которой понимается отношение энергии света, дифрагирующего в один рабочий порядок, к энергии падающего на элемент света) амплитудной пластинки Френеля не превышает 10,1%, а фазоинверсной пластинки Рэлея–Вуда – 40,5%. Работа же Г.Г. Слюсарева показала принципиальную возможность создания дифракционных элементов с эффективностью, близкой к 100%.

Голография в 70-е годы возродила интерес к элементам с зонной структурой, т. к., с одной стороны, дала технологию изготовления элементов с микронными и даже субмикронными зонами, а с другой – позволила модификацией схемы записи управлять законом распределения пространственной частоты по поверхности элемента. Голограммная оптика – такое название получило это направление – бурно развивалась в ряде научных центров и вузов СССР:

в Ленинграде – под руководством Ю.Н. Денисюка и М.А. Гана (ВНЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова”), С.Б. Гуревича и Ю.И. Островского (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), М.М. Бутусова и его ведущих сотрудников Н.В. Ермаковой и С.Н. Гуляева (ЛПИ им. М.И. Калинина), в Казани – под руководством К.С. Мустафина и А.В. Лукина (ГИПО), в Киеве – под руководством М.С. Соскина (ИФ АНУ) и в Пензе – под руководством Г.И. Грейсуха (ПИСИ).

Ю.Н. Денисюку и его соавтору С.И. Соскину принадлежат пионерские работы, посвященные коррекции аберраций оптических систем с помощью голограммных элементов [5, 6], которые легли в основу одного из самых эффективных направлений в дифракционной оптике, успешно развивающегося и в настоящее время.

Параллельно с развитием голографических методов с начала 70-х годов у нас в стране и за рубежом велся активный поиск методов синтеза и переноса непосредственно в подложку элемента рельефно-фазовой структуры, способной обеспечить требуемое преобразование волнового фронта и высокую дифракционную эффективность при минимальном уровне шума. Эти работы шли в двух основных направлениях – использование методов и оборудования микроэлектроники для получения многоуровневой рельефно-фазовой структуры и создание специализированного высокопроизводительного оборудования, ориентированного на получение пилообразной рельефной структуры.

Наиболее впечатляющие успехи на первом направлении были достигнуты под научным руководством Ю.Г. Туркевича и С.Т. Боброва в ЛКТБ ЛОЭП “Светлана” [7] а также под руководством М.А. Гана и А.Ф. Первеева в ВНЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова” [8].

Отечественными пионерами в развитии направления, связанного с созданием специализированного оборудования для дифракционной оптики, был коллектив сотрудников Новосибирского ИАиЭ СО АН СССР, руководимый В.П. Коронкевичем и А.Г. Полещуком, а также коллектив сотрудников ФУП НПО ГИПО, руководимый К.С. Мустафиным и А.В. Лукиным. Новосибирцы создали несколько поколений прецизионных лазерных фотопостроителей, позволяющих наносить зонную структуру на

вращающиеся диски диаметром до 300 мм, а также разработали и внедрили технологии изготовления высокочастотных рельефно-фазовых ДОЭ с многоуровневым и непрерывным профилем [9–12]. В ГИПО создан крупнейший в мире научно-технический комплекс дифракционной и асферической оптики. Производство дифракционных элементов оснащено уникальным алмазореальным технологическим оборудованием и измерительной аппаратурой [13]. Современные же методы формообразования на основе прецизионной штамповки легли в основу конкурентоспособных технологий массового тиражирования таких элементов.

Успехи в области технологии изготовления ДОЭ интенсифицировали и теоретические исследования их оптических свойств. Так, в последние два-три десятилетия были всесторонне исследованы фокусирующие и аберрационные свойства одиночных дифракционных линз, структура которых выполнена на плоской, сферической или даже асферической поверхностях, созданы методики расчета аберраций третьего и высших порядков оптических систем с такими линзами [14–30]. Предложены схемы объективов, состоящих из двух и трех дифракционных линз [31–36]. Разработаны принципы построения, схемные решения и методики расчета гибридных систем различного функционального назначения, чьи улучшенные оптические характеристики достигаются благодаря сочетанию дифракционных и традиционных элементов [37–47].

К ДОЭ относятся также голограммные и синтезированные фокусирующие плоские и вогнутые дифракционные решетки с непрямолинейными штрихами и квазипериодической структурой, чья пространственная частота изменяется по заданному закону. Такие решетки позволили, в частности, создать спектральные приборы с характеристиками, недостижимыми при использовании классических решеток [48].

Особое место в современной дифракционной оптике занимают элементы, фокусирующие лазерное излучение в заданные линии или фигуры. Эти элементы, названные фокусаторами, предложены и впервые исследованы в нашей стране в 1981 г. М.А. Голубом, С.В. Карпеевым, А.М. Прохоровым, И.Н. Сисакином и В.А. Сойфером [49]. Творческими коллективами, возглавляемыми И.Н. Сисакином и В.А. Сойфером, созданы методы расчета фокусаторов, доказаны теоремы существования и разрешимости задач синтеза таких элементов. Преодолены проблемы достижения высокой энергетической эффективности при формировании требуемого распределения интенсивности в фокальной плоскости. Созданы и прошли испытания фокусаторы лазерного излучения ближнего и дальнего ИК-диа-

пазонов в отрезок, в кольцо, в двумерную прямоугольную область. Особенно актуально использование фокусаторов при решении задач упрочнения и обработки материалов лазерным излучением [50].

В заключение выделим наиболее значимые практические успехи, достигнутые благодаря использованию ДОЭ нескольких типов, охваченных данным обзором:

– производственный контроль качества крупногабаритной асферической оптики с помощью голограммных корректоров волнового фронта [13, 51];

– серийное производство спектральных приборов, чьи повышенные оптические и эксплуатационные характеристики достигнуты, благодаря использованию неклассических диспергирующих элементов [13, 48];

– отечественное и зарубежное производство коллиматорных, ИК и фотографических объективов с киноформными элементами, отличающихся улучшенными оптическими и массогабаритными параметрами [13, 40, 41].

Есть все основания полагать, что развитие передовых и, в частности, электронно-лучевых технологий синтеза дифракционных структур, по всей вероятности, откроет новые возможности решения актуальных научных и технических задач с помощью дифракционных оптических элементов.

## Литература

1. *Френель О.* Избранные труды по оптике: Пер. с англ. – М.: ГИТТЛ, 1955.
2. *Wood R.W.* Phase-reversal zone-plates and diffraction-telescopes // *Philos. Mag.* 1898. V. 45. P. 511–522.
3. *Слюсарев Г.Г.* Оптические системы с фазовыми слоями // *ДАН СССР.* 1957. Т. 113, № 4. С. 780–782.
4. *Lesem L.B., Hirsch P.M., Jordan J.A.* The kinoform: a new wavefront reconstruction device // *IBM J. Res. Dev.* 1969. V. 13. P. 150.
5. *Денисюк Ю.Н., Соскин С.И.* Голографическая коррекция деформационных аберраций главного зеркала телескопа // *Опт. и спектр.* 1971. Т. 31. В. 6. С. 992–999.
6. *Денисюк Ю.Н., Соскин С.И.* Голографическое исправление аберраций оптической системы, обусловленных деформацией главного зеркала // *Опт. и спектр.* 1972. Т. 33. В. 5. С. 994–995.
7. Изготовление голографических оптических элементов методами фотолитографии и ионного травления / Бобров С.Т., Котлецов Б.Н., Минаков В.И., Туркевич Ю.Г. // *Оптическая голография и ее применение в промышленности.* Л., 1976. С. 31–32.
8. *Ган М.А., Первеев А.Ф.* Киноформная оптика – свойства и проблемы рационального использования // *Известия АН СССР. Сер. Физическая.* 1988. Т. 52, № 2. С. 210–216.

9. *Кирьянов В.П., Коронкевич В. П., Наливайко В.И. и др.* Киноформы. Оптическая система для синтеза элементов. Препринт. Новосибирск, 1979. 38 с. (ИаиЭ СО АН СССР; № 99).
10. *Корольков В.П., Коронкевич В.П., Михальцева И.А. и др.* Киноформы: технологии, новые элементы и оптические системы // Автометрия. 1989. № 3. С. 95–102, № 4. С. 47–64.
11. *Полещук А.Г.* Изготовление элементов дифракционной оптики с помощью полутоновой и растровой технологий // Автометрия. 1991. № 3. С. 66–76.
12. *Полещук А.Г.* Изготовление рельефно-фазовых структур с непрерывным и многоуровневым профилем для дифракционной оптики // Автометрия. 1992. № 1. С. 66–79.
13. Оптический вестник (изд. оптического общества им. Д.С. Рождественского, С. Петербург). 2002. № 105. Научно-производственному объединению “Государственный институт прикладной оптики” 45 лет: Тем. вып. 28 с.
14. *Latta J.N.* Computer-based analysis of hologram imagery and aberrations // *Applied Optics*. 1971. V. 10, № 3. P. 599–608.
15. *Власов Н.Г., Мосякин Ю.С., Скромцкий Г.В.* Фокусирующие свойства голограмм сходящихся пучков // Квантовая электроника. 1972. № 7. С. 14–19.
16. *Young M.* Zone plate and their aberrations // *Journal of Optical Society of America*. 1972. V. 62, № 8. P. 972–976.
17. *Мустафин К.С.* Аберрации тонких голограмм, изготовленных на сферических подложках // Проблемы голографии. М.: МИРЭА, 1973. В. 1. С. 58–61.
18. *Welford W.T.* Isoplanatism and holography // *Optics Communications*. 1973. V. 8, № 3. P. 239–243.
19. *Welford W.T.* A vector raytracing equation for hologram lenses of arbitrary shape // *Optics Communications*. 1975. V. 14, № 3. P. 322–323.
20. *Ган М.А.* Лучевой метод анализа голографических оптических элементов // Журнал научн. и приклад. фотогр. и кинемат. 1976. Т. 21. С. 202–205.
21. *Ган М.А.* Моделирование на ЭВМ голографической коррекции аберраций оптических систем // Опт. и спектр. 1976. Т. 41. В. 4. С. 652–659.
22. *Smith R.W.* A flat field holographic lens with no first order astigmatism // *Optics Communications*. 1976. V. 19, № 2. P. 245–247.
23. *Грейсух Г.И., Прохоров М.А., Шитов В.Г.* Компенсация аберраций осевой голографической линзы с вынесенным входным зрачком // Журнал технической физики. 1979. Т. 49. В. 5. С. 1032–1034.
24. *Бобров С.Т., Туркевич Ю.Г.* Методика расчета волновых аберраций сложных голографических систем // Опт. и спектр. 1979. Т. 46. В. 5. С. 986–991.
25. *Mehta P.C., Syam Sunder Rao K., Hradaynath R.* Higher order aberrations in holographic lenses // *Applied Optics*. 1982. V. 21. № 24. P. 4553–4558.
26. *Грейсух Г.И., Степанов С.А.* Аберрационный анализ оптических систем, включающих дифракционные элементы // Опт. и спектр. 1983. Т. 54. В. 1. С. 164–166.
27. *Ган М.А.* Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. Л.: ГОИ, 1984. 140 с.
28. *Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г.* Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение. 1986. 223 с.
29. *Ежов Е.Г., Степанов С.А.* Расчет хода псевдолоучей через дифракционные структуры, выполненные на сферической поверхности // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ. 2000. В. 20. С. 25–28.
30. *Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Степанов С.А.* Расчет хода псевдолоучей через оптические системы, включающие дифракционные линзы, структура которых выполнена на асферической поверхности // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ. 2001. В. 21. С. 70–72.
31. А. с. 892399 СССР. Монохроматический объектив для проекционной фотолитографии / С.Т. Бобров, Б.П. Котлецов, Ю.Г. Туркевич. Оpubл. 1981. Бюл. № 47.
32. А. с. 913318 СССР. Монохроматический объектив / С.Т. Бобров, Ю.Г. Туркевич. Оpubл. 1982, Бюл. № 10.
33. А. с. 995053 СССР. Монохроматический объектив десятикратного увеличения / Г.И. Грейсух, В.Г. Шитов. Оpubл. 1983. Бюл. № 5.
34. А. с. 1045203 СССР. Монохроматический объектив / С.Т. Бобров. Оpubл. 1983. Бюл. № 36.
35. А. с. 1053055 СССР. Монохроматический объектив / С.Т. Бобров, Г.И. Грейсух. Оpubл. 1983. Бюл. № 41.
36. А. с. 1103180 СССР. Монохроматический объектив / Г.И. Грейсух, В.Г. Шитов. Оpubл. 1984. Бюл. № 26.
37. А. с. 1151905 СССР. Фотографический объектив / Д.С. Волосов, М.А. Ган, Пожинская И.И. Оpubл. 1985. Бюл. № 15.
38. А. с. 1176281 СССР. Монохроматический объектив однократного увеличения / Г.И. Грейсух, С.А. Степанов. Оpubл. 1985. Бюл. № 32.
39. А. с. 1744682. Малолинзовый термонерасстраиваемый объектив / М.А. Ган, Пожинская И.И. Оpubл. 1992, Бюл. № 24.
40. *Ган М.А.* 50 лет киноформной оптики. Итоги и перспективы развития // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 7. С. 9–16.
41. [Http://www.canon.com/do-info/](http://www.canon.com/do-info/)
42. *Yasuo Kimura, Seizen Sugama and Yuzo Ono.* Compact optical head using a holographic optical element for CD players // *Applied Optics*. 1988. V. 27. № 4. P. 668–671.
43. *Wayne Knapp, Gary Blough, Kumar Khajurivala, etc.* Optical design comparison of 60x eyepieces: one with a diffractive surface and one with aspherics // *Applied Optics*. 1997. V. 36. № 20. P. 4756–4760.
44. *Jennifer L. Rouke, Mary Kate Crawford, David J. Fischer, etc.* Design of three-element night-vision goggles



- gle objectives // *Applied Optics*. 1998. V. 37. № 4. P. 622–626.
45. *Greisukh G.I., Ezhov E.G., Stepanov S.A.* Diffractive-Refractive Hybrid Corrector for Achromatic and Apochromatic Corrections of Optical Systems // *Applied Optics*. 2006. V. 45. № 24. P. 6137–6141.
46. *Ezhov E.G.* Design of combined pick-up optical heads // *Applied Optics*. 2006. V. 45. № 31. P. 8040–8043.
47. *Ежов Е.Г., Степанов С.А.* Апохроматизация жесткого градиентного эндоскопа // *Автометрия*. 2007. Т. 43. № 1. С. 91–97.
48. *Павлычева Н.К.* Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2003. 198 с.
49. *Голуб М.А., Карпеев С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А.* // *Письма в ЖТФ*. 1981. Т. 7. № 10. С. 618.
50. *Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович и др.; Под ред. В.А. Соифера.* М.: “Физматлит”. 2000. 688 с.
51. *Коронкевич В.П., Ленкова Г.А., Маточкин А.Е.* Синтетическое пробное стекло // *Автометрия*. 2002. Т. 38. № 3. С. 20–31.

## ИЗОБРАЗИТЕЛЬНАЯ ГОЛОГРАФИЯ. РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ОБЗОР И ПРОГНОЗ

В. А. ВАНИН

### Изобразительная голография в СССР и работы НИИ “Платан”

Этот семинар особый – он посвящен памяти Ю.Н. Денисюка, который был моим Учителем более 30 лет. Я имею честь представлять Научоград Фрязино, где голография появилась в 1967 г. в НИИ электронных приборов “Платан”, благодаря мудрости и прозорливости В.Л. Геруса, заместителя директора по научной работе этого института. Только готовясь к этому семинару, я осознал неслучайность этого события. В. Герус, как и Д. Габор, – известный специалист в электронной оптике, они – практически одногодки и, конечно же, знали о работах друг друга. Обратите внимание, у них похожи не только фамилии, научные интересы, но и лица (рис. 1).

В Советском Союзе было несколько организаций, которые специализировались на различных аспектах изобразительной голографии:

- Прежде всего, это ГОИ им. С.И. Вавилова, (руководитель голографического направления Ю.Н. Денисюк) – наша “альма матер”. Здесь разрабатывалась теория, создавались новые технологии и фотоматериалы, лазерная техника, записывались великолепные большие голограммы, видимые в белом свете.

- НИКФИ под научным руководством В.Г. Комара разрабатывал систему голографического кинематографа, попутно создавая также новые материалы

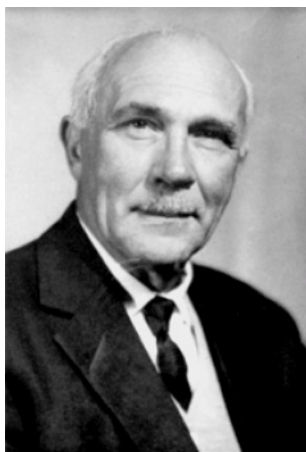


Рис. 1. В. Герус – научный руководитель “Платана”.



Д. Габор – изобретатель голографии.

Голография – это свет,  
А свет – это Бог.

и установки руками и головой голографического Кулибина – О.Б. Серова.

- НИИ “Платан”, как прикладной институт, занимался применением изобразительной голографии в товарах бытового назначения.

- Институт Физики АН УССР (В.Б. Марков, С.Г. Одулов, А.Н. Тимошенко) вместе с Министерством культуры Украины (И.Г. Евтушенко), при поддержке ЮНЕСКО, специализировались на проведении международных выставок голограмм музейных объектов.

- Уникальные фотоматериалы для голографии серии “ПЭ” были разработаны в ГОСНИИХИМФО-ТОПРОЕКТЕ под руководством Н.И. Кириллова и внедрены на заводе “Славич” энергичными усилиями А.И. Шварцвальда. Ю.А. Сазонов смог сохранить эту ценность и наладить производство лучших в мире фотоматериалов для цветной голографии.

- В Белоруссии об изобразительной голографии постоянно заботился Л.В. Танин, старожилы голографии помнят великолепные выставки голограмм в Минске.

- Заканчивая этот краткий обзор, нельзя не вспомнить о замечательном ученом Ш.Д. Какичашвили, работавшем в Институте кибернетики г. Тбилиси. Он не только автор открытия голографической записи поляризации волнового поля, но и изобретатель новых схем и технологий для изобразительной голографии.

Но вернемся к нашему институту НИИ “Платан”. Поскольку основной задачей было внедрение голографических разработок, мы творчески взаимодействовали со всеми голографическими фирмами.

Основные наши результаты:

- Разработан новый метод, технология и оборудование для промышленного производства голограмм.

Впервые в СССР был выполнен крупный экспортный заказ по разработкам и поставкам изобразительных голограмм в Данию. Заказ выполнялся через В/О “Международная книга” на бартерной основе – на все вырученные деньги – приблизительно 150 тыс. американских долларов – нам было поставлено лазерное оборудование фирмы “Cogenent Radiation”. С помощью В/О “Международная книга” был изготовлен рекламный проспект “Holograms from the USSR”, который распространялся через ее торговых



**Рис. 2.** Коллектив голографического отдела НПО “Платан” (г. Фрязино, Московская область). Сидят (слева направо): начальник отдела – В.А. Ванин, ведущие сотрудники: В.А. Кутынина, Б.Л. Наумов, стоят (слева направо): ведущие разработчики В.А. Румянцев, С.П. Воробьев, И.А. Михайлов.

представителей во всех странах мира. На рис. 2 представлена страница из этого проспекта – это коллектив голографического отдела НИИ “Платан”.

- Разработана новая промышленная технология получения голограмм на “идеальном” фазовом фотоматериале – бихромированной желатине (преобразование света в полезное голографическое изображение происходит практически без потерь).

По контракту с фирмой “Magic Laser” (Франция, Париж) было изготовлено и поставлено около 10 000 таких голограмм.

- Впервые разработана новая продукция – “Голографический светильник”, в котором голограмма является органичным элементом дизайна изделия.

Изделие разрабатывалось и выпускалось совместно с крупным предприятием ВПК СССР – Заводом им. Калинина (г. Свердловск, ныне Екатеринбург). НПО “Платан” изготавливал и поставлял голограммы, ЗИК – фурнитуру светильника.

- Изготовление голографических копий музейных и других раритетов. По заказу АН СССР изготовлены голографические копии всех наград, включая Нобелевскую медаль академика П.Л. Капицы. Полный комплект голографических копий наград находится в Физическом институте АН России; кстати, П.Л. Капица одним из первых заинтересовался открытием Ю.Н. Денисюка.

По заказу Министерства культуры СССР изготовлена серия голограмм “Русское ювелирное искусство 18 века” из фондов Оружейной Палаты Московского Кремля.

- Проведена совместная работа с НИКФИ СССР по получению объемного портрета человека с использованием голографии и интегрального линзового раstra (автор схемы Г.Г. Голенко). Ценность метода в том, что портрет снимается при освещении обычным светом.

Несколько слов об истоках возникновения голографии и о дуализме нашего мира.

### Философские аспекты открытия голографии

Мы живем в трехмерном, полноцветном мире, который меняется, двигаясь по шкале времени. Для удовлетворения своих духовных и материальных потребностей человек всегда нуждался в точном отображении существующего мира. Эта потребность способствовала созданию различных способов и средств отображения, таких как живопись, фотография, кино, телевидение, полиграфия. Все эти средства объединяет одна общая особенность: на материальный носитель информации отображаются только двумерные признаки объектов. Такие характеристики сцены, как объемность предметов, их удаленность от наблюдателя, свойства материи частично воспринимаются нами только благодаря психофизическим особенностям зрительной системы человека и его мозга. Открытие голографии позволило регистрировать признаки объемности и фактуру материала, связанные с фазой и поляризацией волнового поля объекта. Это коренным образом может поменять процесс взаимодействия человека с окружающей природой. Мы живем в равновесии с миром вещей и технологических процессов. Восторг от появления чего-то нового, будь то телевидение, Internet или мобильная связь, проходит довольно быстро, затем образуется привычка, которая и является основой этого равновесия. Развитие материального мира по принципу обратной связи воздействует на развитие нашего сознания. В жизни человека одно нельзя отделить от другого. Конечно, вначале было слово, но оно тут же материализовалось.

Возникновение голографии не случайно. Бесспорно – это одно из наиболее удивительных открытий нашей эпохи; правомерно также, что ее считают чудом XX века.

Но, на мой взгляд, самое главное – это то, что человечество получило более совершенный инструмент в познании окружающего мира. И это должно положительно сказаться на развитии его Сознания. По меркам истории прошло не так много времени, а применение голографических методов уже оказывается результативным во многих областях человеческих знаний, в том числе в объяснении работы мозга человека и устройства Вселенной.

В мире существуют два подхода в изучении различных предметов и явлений, так называемый Западный и Восточный. Летом 1930 года на даче Эйнштейна под Берлином произошла встреча Эйнштейна с Рабиндранатом Тагором. Эти два великих человека вели беседу о Реальности и о соотношениях между Материей и Сознанием Человека. Эйнштейн, будучи представителем науки Запада, утверждал, что Реальность (материя, по представлению западной науки) существует независимо от опыта и сознания Человека. Материя первична, а сознание является продуктом высокоразвитой материи.

Возражая Эйнштейну, Рабиндранат Тагор отстаивал точку зрения философов древнего Востока и говорил об Универсальном человеке, в котором заключена рациональная гармония между субъективным и объективным аспектом реальности.

Прошло более полувека с той знаменательной встречи, и в результате развития идей Эйнштейна появилась теория физического вакуума, которая не только включает сознание в картину мира, но и указывает на определяющую роль некоей Высшей реальности при рождении грубой материи из ничего. Высшая реальность рассматривается рядом исследователей, как Сверхсознание, Сверхразум, или Бог (Универсальный человек). Появившуюся голографию некоторые авторы рассматривают как инструмент подключения сознания Человека к Сверхсознанию.

Размышляя о философских аспектах открытия изобразительной голографии, хочется привести слова выдающегося отечественного физика, академика С.И. Вавилова, который в своей книге “Глаз и Солнце” писал: “В наше время рядом с наукой, одновременно с картиной явлений, раскрытой и объясненной новым естествознанием, продолжает бытовать мир представлений ребенка и первобытного человека и, намеренно или ненамеренно, подражающий им мир поэтов. В этот мир стоит иногда заглянуть как в один из возможных источников научных гипотез. Он удивителен и сказочен; в этом мире между явлениями природы смело перекидываются мосты связей, о которых иной раз наука и не подозревает. В отдельных случаях эти связи угадываются верно, иногда они в корне ошибочны и просто нелепы, но всегда заслуживают внимания, так как эти ошибки нередко помогают познать истину”.

Первооткрыватель изобразительной голографии наш Учитель Ю.Н. Денисюк был хорошо знаком с миром поэтов и философов. Среди его друзей в этом мире были Платон, Лукреций Кар, Иван Ефремов. Возможно, он черпал у них новые идеи и проверял свои гипотезы. Помню Прагу, май, конец 70-х. Закончилась работа конференции по голографии, организованное “Interoptik”. Возвращаясь в гостиницу

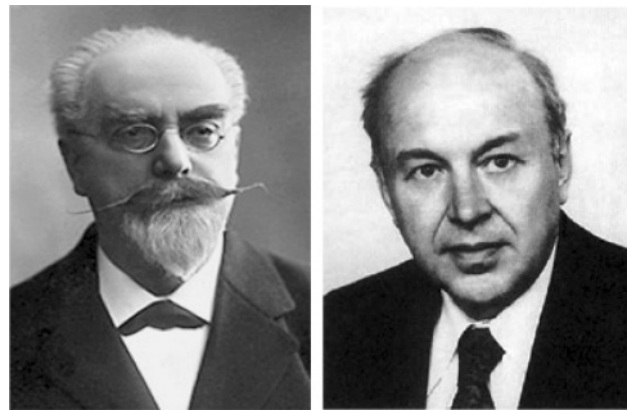


Рис. 3. Габриэль Липпман Юрий Денисюк

вместе с Валичеком (организатор “Interoptik”) и Ю.Н. Денисюком, становлюсь невольным свидетелем их увлеченной беседы о Платоне.

### Идеальная голограмма и схема Ю. Н. Денисюка

С идеальной голограммой мы сталкиваемся каждый день по многу раз, не всегда отдавая себе в этом отчет. Это – зеркало.

Зеркало в динамическом режиме формирует четкое, цветное, объемное изображение, причем запись и воспроизведение происходит практически одновременно в обычном белом свете. Тайна зеркала волновала многих ученых и поэтов. Я уверен, что Габриэль Липпман и Юрий Денисюк не были исключениями (рис. 3).

Сравним три формальные схемы получения изображения объекта: зеркальное отражение (рис. 4), волновую фотографию Г. Липпмана (рис. 5) и отражательную голограмму Ю. Денисюка (рис. 6).

В схемах Г. Липпмана и Ю. Денисюка регистрируются стоячие волны, причем в схеме Г. Липпма-

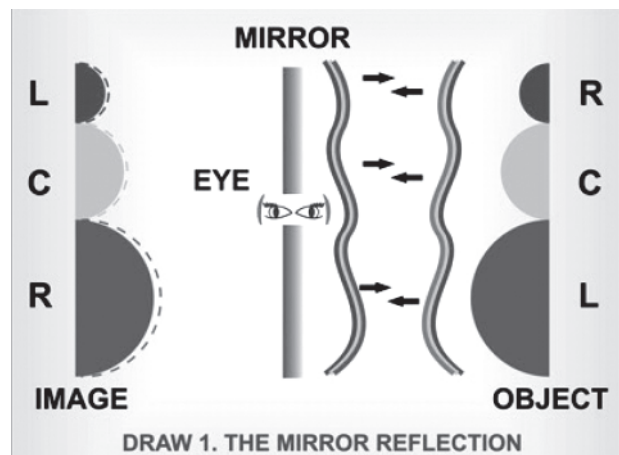


Рис. 4.



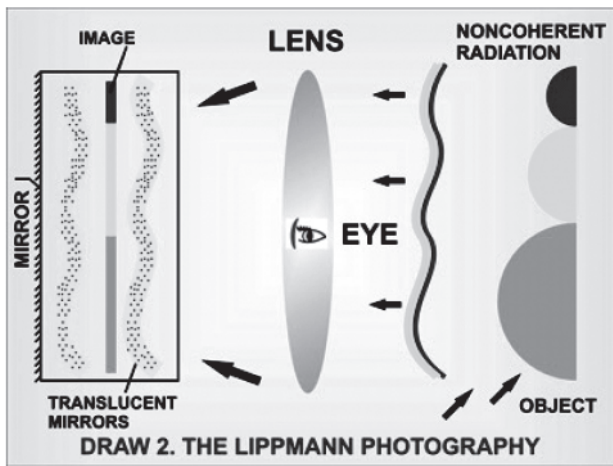


Рис. 5.

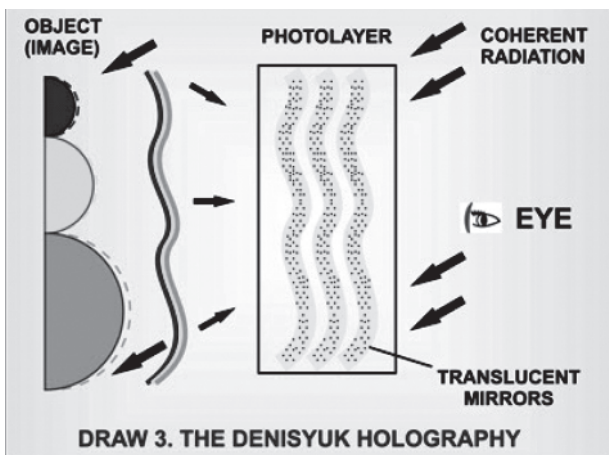


Рис. 6.

на используется белый свет и волна интерферирует с собственным отражением, а в схеме Ю. Денисюка используется когерентный свет и объектная волна интерферирует с освещающим объект простым (опорным) пучком света. В результате, волновая фотография Г. Липпмана восстанавливает цветное, плоское изображение объекта, а отражательная голограмма Ю. Денисюка – цветное объемное изображение объекта.

В своих первых опытах Ю. Денисюк повторил работы Г. Липпмана и записал волновую фотографию линзы, которая фокусировала солнечный свет, т. е. обладала физическими свойствами объекта.

Интересно заметить, что волновая фотография и голограмма данного объекта строят практически одинаковое изображение.

Обе схемы можно рассматривать, как первый и второй уровни приближения к “идеальной” голограмме. Но остаются существенные ограничения: необходимость использования когерентного излучения при записи и направленного точечного источ-

ника при восстановлении. Очевидно, что это плата за наше неумение регистрировать бегущую волну, как это “делает зеркало”.

### Голографическая техника сегодняшнего дня

Рассмотрим, насколько сегодняшняя техника приблизилась к созданию “идеальной” голограммы. Просматривая труды первопроходцев голографии и, прежде всего Ю.Н. Денисюка, я был приятно удивлен, что передовая техника сегодняшнего дня использует его схему записи голограмм и реализует часть идей, связанных с обработкой изображений при записи синтезированных голограмм.

Юрий Николаевич достаточно давно высказывал мысль, что существенный прогресс в развитии изображительной голографии наступит при использовании компьютерной техники для расчета и записи голографических изображений. Так и произошло.

Мне известны три фирмы, лидирующие в мире в области получения цветных крупноформатных голограмм: “UAB Geola” (Вильнюс, Литва, руководитель Станислав Захаровас), “XYZ Imaging” (Монреаль, Канада) и “Zebra Imaging” (США), которая работает в тесном контакте с известной американской фирмой “IBM corporation”.

В основном, технологические процессы получения голограмм, используемые этими фирмами, похожи.

Я не буду вдаваться в подробности, остановлюсь лишь на некоторых интересных моментах. По существу, это – композиционные голограммы, представляющие собой мозаику из множества одинаковых субголограмм отражательного типа, причем каждый элемент этой мозаики является триадой моноцветных голограмм, записываемых с использованием цветного лазера. Информация в предметном пучке представлена в цифровом виде и рассчитывается ЭВМ с учетом положения наблюдателя и заданного угла обзора сцены.

В этой технологии можно выделить четыре основных компонента:

- использование ЭВМ для расчета изображения каждой субголограммы;
- цветной лазер;
- специальные цветные фотоматериалы;
- специальный голографический принтер.

Две фирмы – “UAB Geola” и “XYZ Imaging” – используют российские серебряно-галоидные цветные фотоматериалы типа ПЭ-3 и импульсный лазер, а “Zebra Imaging” записывает свои голограммы на фотоматериалах фирмы “Du Point” с помощью непрерывного лазера. Данная методика позволяет соединить в одной голограмме визуальный мир, придуманный человеком с миром окружающих нас

предметов, т. е. голограмма снимает проблему первичности сознания или материи.

Создание этой технологии является существенным шагом на пути развития изобразительной голографии. Идеологически этот процесс стыкуется с существующей цифровой полиграфией, разве что дороже и сложнее. Но ведь совсем недавно и цифровая печать была экзотикой.

Реальной областью применения таких голограмм является визуализация дизайнерских и архитектурных разработок, недаром первыми откликнулись автомобильные фирмы, вложив миллионы долларов в эти проекты.

Другое важное применение лежит в области объемной визуализации в видимом диапазоне света результата компьютерного анализа массивов информации, полученной при сканировании объектов исследования разными видами волн (радио, ультразвуковыми, рентгеновскими и др.). Это может представлять интерес в геологоразведке, военной области, топографии, в медицине при исследовании внутренних органов человека и других подобных задачах. При этом голографический принтер может находиться у заказчика, а обработка данных производится специализированной фирмой и передаваться по различным каналам связи.

Заканчивая краткий обзор этой технологии, отмечу возможность построения составного экрана практически любого размера для коллективного просмотра объемных изображений: размер ячейки экрана может варьироваться от 0,2 до 1,0 метра.

### “Яйцо жизни”

Мы решили на практике проверить только что описанную технологию получения голограммы. Был выбран объект, который, на наш взгляд, может наиболее удачно представить миссию голографии. Это – так называемое “яйцо жизни” Два слова об этом понятии:

– существуют несколько сторон (подходов) при рассмотрении эволюции эмбриона человека: полевая, геометрическая, биологическая. Мы рассматриваем чисто геометрическую сторону;

– основа нашего существования состоит из “шариков” – сфер всех возможных размеров. Мы находимся на сфере “Земля”, сферы вращаются вокруг нас. “Луна”, “Солнце”, звезды – сферы. Вся Вселенная создана из маленьких сфер. Даже световые волны, движущиеся сквозь пространство, тоже являются сферами; они распространяются сферически.

• Концепция образования “Яйца жизни”:

– из “ничего” (“физического вакуума”) зарождается сфера (“яйцеклетка”), которая затем, в результате последовательного деления, вначале превраща-

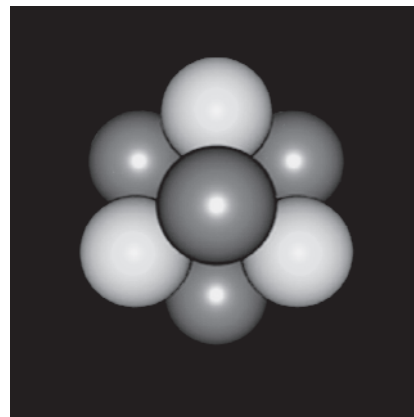


Рис. 7.

ется в один тетраэдр (4 клетки), а затем при 8 клетках – в два взаимопроникающих тетраэдра (т. н. звездный тетраэдр, или “Яйцо жизни”). Говорят, это есть те самые стволовые клетки, которые не умирают и несут информацию о всем организме, подобно голограмме.

Наша голограмма была записана в фирме “UAB Geola” при содействии С.Б. Одинокова. На рис. 7 представлен центральный ракурс этого объекта. Следует заметить, что есть проблемы с цветопередачей: оранжевые шары не получились чистыми по цвету и отличаются друг от друга по цветовым оттенкам.

### Перспективы развития голографии, в том числе изобразительной

Как известно, прогнозы – дело неблагоприятное, прежде всего потому, что они редко сбываются. Их стараются не делать в начале научной карьеры. Меня это уже не беспокоит, потому попробую.

Базовые положения для моего прогноза:

1. Известные всем основные свойства голографического метода и голограмм, такие как:

– Применяемость для всех видов волновых полей в том числе и для таких спорных, как биополя и торсионные поля;

– Распределение информации о каком-то событии, или точки объекта по всему полю голограммы;

– Возможность ассоциативного поиска информации.

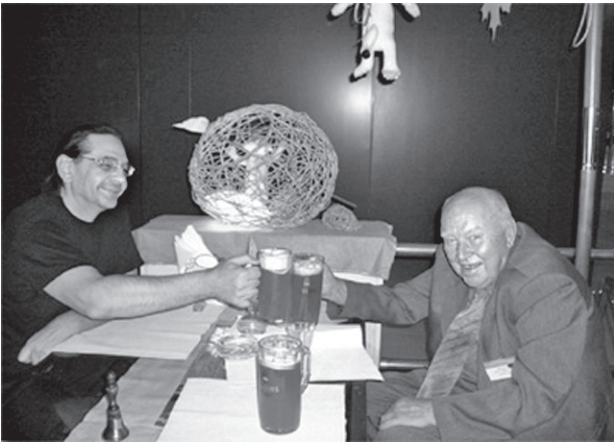
2. Сравнение достигнутого уровня развития с идеальной голограммой (зеркалом).

3. Мысли, высказываемые людьми, хорошо знакомыми с современной наукой, но имеющими смелость писать научно-популярные книги. На эту тему мне нравятся книги А. Азимова и семейства супругов Тихоплавова.

Вначале о том, что более или менее понятно.



**Рис. 8.** “ГолоЭкспо-2005” (слева направо: ген. директор ОАО “Мособлзнак” В.А. Ванин, отец русской голографии Ю.Н. Денисюк, нач. отдела МГТУ им. Баумана С.Б. Одинокоев).



**Рис. 9.** “ГолоЭкспо-2005”. Отдых в гостинице “Космос” (руководитель фирмы “UAB Geola” (Вильнюс) С. Захаровас, Ю.Н. Денисюк).

Необходимость восстановления голограммы специальным источником света сильно ограничивает область применения изобразительной голографии.

В количественном плане прогресс, видимо, будет идти по пути замены галогенных источников света светодиодными, которые имеют более высокую светоотдачу. В идеале же каждая субголограмма должна активно излучать свет по заданной программе. Это представляется возможным с применением нанотехнологии как инструмента формирования субголограмм. Следующим шагом должно быть создание голографических экранов с реверсивной записью.

Здесь уместно вспомнить выступление вице-президента АН СССР Б.П. Константинова на Первой школе по голографии в 1969 г. Обсуждая возможные пути создания голографического телевидения, он, в частности, рассматривал действующую в то

время систему “Эйдофор”. В этой системе под воздействием электронного пучка на тонкой масляной пленке формировалась фазовая картина передаваемого изображения. Масляную пленку нужно заменить другим реверсивным материалом, обладающим разрешающей способностью, достаточной для записи голограмм. Это могут быть своеобразные активно-матричные экраны, аналогично тем, которые применяются сейчас в устройствах отображения информации на базе ЖК-индикаторов. Я думаю, что такая схема может реализоваться, когда субмикронная технология станет повседневностью.

И, наконец, пару слов о таком более “тонком” понятии, как биоголограмма.

Предположим, что каждый вид поля содержит свою часть информации об исследуемом объекте и что эта информация не исчезает во времени и пространстве. Предположим, что биополе содержит информацию о всех процессах жизнедеятельности человека. Тогда, если мы научимся регистрировать голограмму биополя и восстанавливать ее в видимом диапазоне света, то сможем увидеть свое буду-



**Рис. 10.** “ГолоЭкспо-2005”. Обмен мнениями после заседаний (Ю.Н. Денисюк, В.А. Ванин).



**Рис. 11.** Учитель Ю.Н. Денисюк.

шее. Кстати, некоторые это делают уже сейчас и без голографии.

Замечу, что Юрий Николаевич и этот феномен описал в своих работах. Это – так называемые доплеровские голограммы, которые предвидят будущее: голографическое изображение они восстанавливают в том месте, куда затем приходит объект.

Сбудется прогноз или нет, но несомненно, что у изобразительной голографии большое будущее.

В заключение я хотел бы поблагодарить за помощь своих коллег по профессии и работе: В.А. Румянцева, В.А. Шулакова и Г.И. Андреева, а также представить несколько фотографий с конференции “Голофорум-2005” (Москва).



## ГОЛОГРАФИЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ

П. Е. ТВЕРДОХЛЕБ, доктор техн. наук

Институт автоматике и электротетрии СО РАН, Новосибирск

E-mail: tverdokhleб@iae.nsk.su

Проведен обзор наиболее важных мировых достижений в области голографической памяти в течение всего периода ее развития: от ранних пионерских идей П. Дж. Ван Хирдена до современных идей наращивания емкости такой памяти до тера- и петабайтного уровня. Общим для них является то, что все эти идеи базируются на использовании результатов исследований изобретателей голографии – Д. Габора, Ю.Н. Денисюка, Э. Лейта и Ю. Упатниекса.

### 1. Введение. Постановка задачи

Голография, как метод получения трехмерного изображения предмета, изобретена Деннисом Габором в 1948 году [1]. В ее основе, как известно, лежит экспериментально подтвержденная идея о том, что комплексная амплитуда световой волны может быть зарегистрирована в светочувствительной (регистрирующей) среде, а затем восстановлена, в частности, для наблюдения. Запись волнового фронта проводилась с осевым опорным пучком. Потребовалось 14 лет, прежде чем эта новая физическая идея получила более или менее законченный смысловой облик, дала жизнь оптической голографии и получила прочный научный и практический фундамент. Так, в 1962 году Эмметт Лейт и Юрис Упатниекс, располагая лазерным источником света, усовершенствовали идею Д. Габора и получили трехмерное изображение предмета с внеосевым монохроматическим пучком [2]. В том же году Юрий Николаевич Денисюк, обобщая предшествующие идеи Уильяма Лоренса Брэгга и Габриэля Липпмана, обосновал идею получения отражательных голограмм с восстановлением записанных на них изображений белым светом [3]. Тем самым Ю.Н. Денисюком было доказано, что отражательные объемные голограммы, являясь по сути узкополосными спектральными фильтрами, способны избирательно восстанавливать изображения только на тех длинах волн излучения, на которых они были получены. При этом избирательные (селективные) свойства объемной голограммы улучшаются с увеличением толщины регистрирующего слоя.

Первые концептуальные предложения по использованию объемных (или глубоких) голограмм для записи и хранения данных высказаны в 1963 году Ван Хирденом [4]. Исходя из того, что механизмы записи и восстановления изображений в объемных голограммах были, на его взгляд, подобны механизмам работы головного мозга, Ван Хирден отметил важнейшие преимущества голографической памяти перед существующими в то время магнитными,

полупроводниковыми и другими системами. Среди таких преимуществ:

- Чрезвычайно высокая плотность записи данных, ограниченная значением  $10^{10}$  единиц информации (бит) на единицу объема (в  $\text{см}^3$ ). На физическом языке оценка предельно достижимой плотности записи в объеме среды проводится по формуле  $1/\lambda^3$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения, используемого при записи голограмм.

- Высокая помехоустойчивость хранения данных, поскольку каждая из единиц информации записывается в голограмме в виде интерференционной картины, распределенной по всему объему регистрирующей среды. В этом случае неконтролируемая потеря в среде части такой картины не влечет за собой потерю всей единицы информации.

- Возможность использования полного “информационного” ресурса объемной регистрирующей среды за счет наложенной голографической записи многих изображений с последующим селективным восстановлением каждого из них. При этом отдельные изображения должны записываться и восстанавливаться со “своей” кодированной опорной волной. Механизм восстановления изображений с результирующей объемной голограммы, получаемой путем наложенной голографической записи многих из них, был назван ассоциативным.

Несмотря на то, что соображения Ван Хирдена о свойствах объемных голограмм и о создании на их основе качественно нового типа памяти уточнялись и дополнялись в последующее время многими исследователями (см., например, [5]), в том числе и изобретателями голографии – Д. Габором и Ю.Н. Денисюком [6–9], они стали серьезным обоснованием для многих исследовательских и инженерных проектов по голографической памяти в период с 1963 по 2007 год. Проекты выполнялись в США, Англии, бывшем СССР, России, Китае, а также в других странах в разное время и разными специалистами. Тем не менее, общим для них является то, что ни один из них не завершился созданием трехмерной (3D) тех-

нологии голографической памяти, которая могла бы составить рыночную конкуренцию традиционным микроэлектронным и магнитным технологиям. Важнейшей причиной такого положения является отсутствие объемной регистрирующей среды с требуемыми параметрами. Несмотря на чрезвычайную важность других компонент 3D голографической памяти, проблема среды всегда определяла конечные результаты любого из проектов. Стоит эта проблема и в настоящее время, причем в гораздо более обостренной форме.

Дело в том, что к оптическим носителям информации с “объемными” свойствами кроме уже традиционных требований по высокой светочувствительности, сверхвысокой разрешающей способности, обратимости или необратимости инициируемых светом химических превращений, отсутствию “мокрого” процесса проявления, длительному сроку хранения информации и т. п. предъявляются новые требования:

- Сохранения геометрических размеров объема среды, в котором проводилась запись (перезапись) информации, что практически исключает возможность применения носителей с эффектами “усадки” материала.

- Обеспечения малого поглощения света (на рабочей длине волны) при его проникновении в среду на глубину до 1–3 мм, что в свою очередь исключает возможность применения многих из известных поглощающих диэлектрических и кристаллических материалов.

Тем самым круг известных материалов, которые потенциально могут быть использованы, резко сужается и возникает необходимость поиска других, на этот раз, слабопоглощающих регистрирующих сред с “необычными” механизмами записи, основанных, в частности, на нелинейном двухфотонном поглощении. Отсюда следует, что задачи поиска или синтеза требуемых регистрирующих сред являлись главными и первоочередными в любых проектах по голографической памяти.

Цель настоящей статьи – выделить наиболее важные достижения в области голографической памяти в течение всего периода ее развития. Поскольку исследования базовых технологий, элементной базы (в том числе регистрирующих сред), физико-технических решений и их экспериментальная апробация проводились на протяжении последних 44 лет, то в целях удобства весь этот период разбит на два отрезка: первый – этап 1963–1988 гг. и второй – этап 1989–2007 гг. На первом из них изучались, в основном, возможности создания технологии голографической памяти на “тонких” (плоских) регистрирующих средах, на втором – технологии на “толстых” (объемных) средах. Поскольку автор является уча-

стником многих работ, выполненных в этот период в Новосибирске, то иллюстрация достижений в этой области будет проводиться на примерах “сибирских” исследований и разработок, результаты которых ему хорошо известны. Близкие результаты были также получены и другими зарубежными и отечественными научными группами, в том числе группами академика Микаэляна А.Л. и академика Бурцева В.С.

## 2. Развитие технологии голографической памяти (1965 – 1988 гг.)

Первые публикации по голографическим устройствам памяти на плоском носителе появились в 1967–1970 гг. [10–12]. Исследования были ориентированы на создание голографических запоминающих устройств (ЗУ) с произвольной выборкой данных (емкость памяти –  $10^8$  бит, время доступа –  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  с) и голографических массовых ЗУ (емкость памяти –  $10^{12}$ – $10^{13}$  бит, время доступа – 5–10 с). В то время такие устройства памяти конкурировали по плотности записи ( $10^8$  бит/см<sup>2</sup>), стоимости хранения единицы информации ( $10^{-2}$ – $10^{-6}$  цент/бит) и помехоустойчивости с ЗУ на полупроводниковых и магнитных носителях и с ЗУ на магнитных цилиндрических доменах.

### 2.1. Базовые технологии и элементы

В Новосибирске работы проводились Институтом автоматики и электрометрии совместно с другими академическими институтами и промышленными организациями города в 1971 году.

Направления исследований и разработок:

- Разработка технологий создания элементов голографической памяти: управляемых транспарантов, фотодиодных матриц, дефлекторов света, фазовых масок, полупроводниковых лазеров и других.

- Оптимизация режимов голографической записи и считывания больших массивов цифровых данных.

- Создание и испытание экспериментальных устройств/систем голографической памяти, включая средства обмена данными с ЭВМ.

В качестве регистрирующей среды использовались тонкие галоидосеребряные слои на стеклянных и пленочных подложках.

Среди освоенных базовых технологий следует отметить:

- Технологию выращивания, ориентации и обработки монокристаллов парателлурита высокого оптического качества (Конструкторско-технологический институт монокристаллов СО РАН);

- Технологию производства управляемых транспарантов на жидких кристаллах (Сибирский НИИ оптических систем);

– Технологию производства многоуровневых фазовых масок путем прецизионного травления кварцевого стекла (Институт физики полупроводников СО РАН);

– Технологию производства фотодетекторных матричных и линейных приемников видимого диапазона излучения (НПО “Восток”);

– Технологию производства полупроводниковых лазеров для видимой и ближней ИК-области спектра (НПО “Восток”, ПО “Север”).

На их основе были созданы опытные образцы элементов голографической памяти с характеристиками, не уступающими мировому уровню. В их числе: анизотропные акустооптические дефлекторы и модуляторы света (количество элементов разрешения по Релею – 500–4000, полоса рабочих частот – 50–120 МГц, время переключения – 1–10 мкс, дифракционная эффективность – до 80%); электрически управляемые ЖК-транспаранты (32×32 элементов, средний светомодулирующий контраст – не менее 100:1, время набора страницы – 0,25×0,5 с); четырехуровневые фазовые маски 32×32 и 625×625 элементов; фотоприемные матрицы (32×32 элементов, чувствительность –  $10^{-7}$  Дж/элемент.); полупроводниковые лазеры с длинами волн излучения 0,85, 0,78, 0,67 мкм и т. п.

## 2.2. Экспериментальные системы памяти

Новые элементы позволили Институту автоматизации и электрометрии с соисполнителями перейти к разработке экспериментальных систем для записи и считывания больших ( $10^6$ – $10^7$ ) массивов голограмм в автоматическом режиме и исследовать их работу [13, 14]. Голограммы регистрировались на галодосеребряных пластинках в формате страниц с 32×32 бинарными элементами. Были найдены оптимальные условия записи качественных голограмм, накоплен большой статистический материал о характере и частоте ошибок при считывании их информационного содержания, выявлены основные источники ошибок. Впервые дано экспериментальное подтверждение возможности записи/считывания больших массивов голограмм с частотой ошибок не более  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  без применения корректирующих кодов и не более  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  – с применением простейших корректирующих кодов [15–17]. Также было показано, что в голографических ЗУ на плоских носителях при учете реальных дифракционных помех, шумов рассеяния галодосеребряных слоев, аберраций оптики и т.п. практически достижима плотность записи на уровне  $2,5 \times 10^7$  бит/см<sup>2</sup>, что только в четыре раза меньше теоретического предела [18].

Голографическая память на плоских носителях, особенно память с быстрой произвольной выбор-

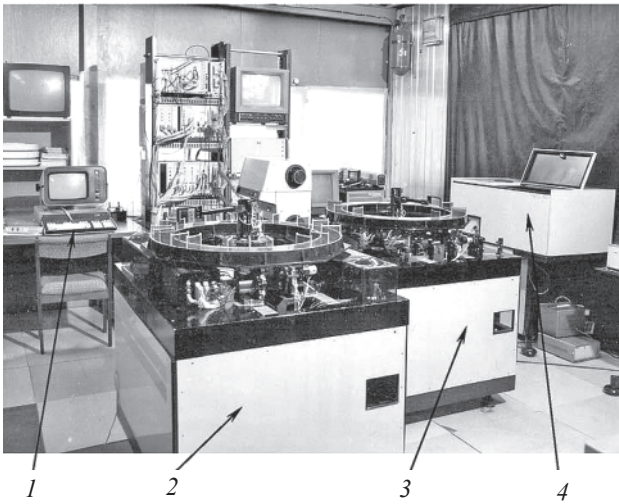
кой, выполнялась в виде матрицы из  $N \times N$  самостоятельных голограмм ( $N = 32, 64, 128$  и более), что исключало возможность использования ранее отмеченного механизма ассоциативного поиска, свойственного объемным голограммам. Соответствующие матричной организации памяти методы ассоциативного поиска были разработаны и апробированы в 1973 году [19]. При этом оказалось, что наиболее простыми, быстродействующими и надежными методами являются такие из них, в которых логическая обработка восстановленных двоичных страниц признаков проводится с помощью специализированных цифровых однокристалльных БИС с параллельным оптическим входом. Были разработаны алгоритмы простых и сложных видов поиска [20], а также образцы однокристалльных БИС с матрицей из 32×32, 32×36 фотодетекторов [21, 22], обеспечивающих быстрый последовательный “просмотр” двоичных признаков, восстанавливаемых с голограмм.

Полученные результаты позволили создать архивную голографическую память с ассоциативным поиском данных [23–25] и скоростной голографической накопитель данных на основе пакета дисков [26–28].

Архивная голографическая память предназначалась для накопления, долговременного хранения, коррекции, поиска и выдачи информации в виде двоично-кодированных данных (ЭВМ) и в виде текстовых, графических, фотографических и других изображений ТВ-стандарта (человек). Планируемые области применения – исследование природных ресурсов Земли, службы научно-технической информации, службы стандартизации, геофизика, картография, медицина и т. п.

Содержания двоичных страниц (32×32 элем.) и ТВ-изображений (625×625 элем.) записывались и хранились в отдельных голограммах модулей памяти, которые в том и другом случаях представляли собой фотопластинку размером 76×76 мм<sup>2</sup> и толщиной (в оправе) 3 мм. Диаметр голограммы – 0,3 мм, общее количество голограмм в модуле – 160×170. На рис. 1 приведен внешний вид управляемой от ЭВМ голографической памяти, в составе которой были цифровой архив (300 модулей памяти), архив изображений (300 модулей памяти) и соответствующие им устройства голографической записи цифровых данных и ТВ-изображений. Емкость страницы данных (32×32 бит) определялась размерами электрически управляемого жидкокристаллического транспаранта при записи данных и размерами фотодетекторной матрицы при их считывании (в обоих случаях 32×32). На рис. 2 показано изображение космического снимка, полученного с экрана цветного монитора. Цифровой массив, необ-





**Рис. 1.** Система архивной голографической памяти. 1 – рабочее место оператора; 2 – цифровой архив; 3 – архив изображений; 4 – устройство записи модулей памяти.

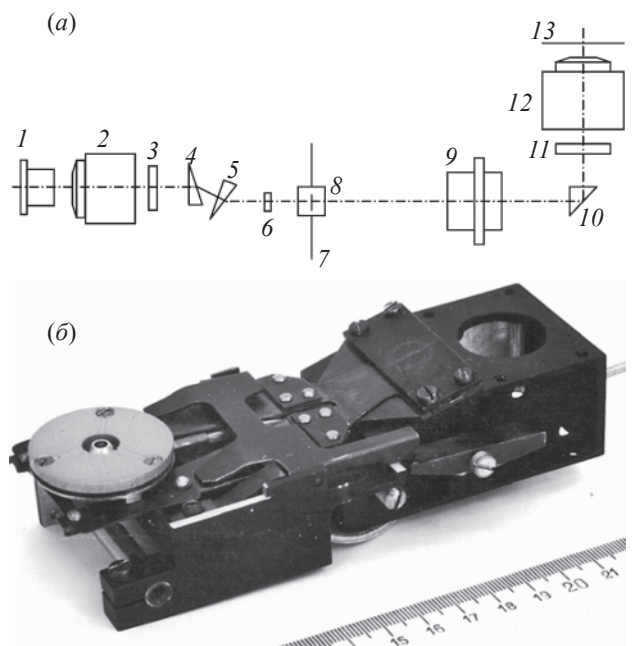
ходимый для построения такого изображения в цветах, восстановлен из голографического модуля памяти. На этот период реально достигнутая плотность записи данных на тонких галоидосеребряных пленках составляла  $2 \times 10^7$  бит/см<sup>2</sup>.

В основу работы голографического накопителя данных положен многоканальный способ записи данных в виде одномерных (линейных) голограмм Фурье размером  $105 \times 3$  мкм<sup>2</sup> [26]. Своей длинной стороной голограммы размещаются вдоль радиуса диска. Информационная емкость каждой из голограмм – 64 бит. Малогабаритная оптическая головка, схема и конструкция которой приведены на рис. 3, обеспечивала регистрацию  $10^6$  голограмм в секунду, что соответствовало скорости записи 64 Мбит/с. Головка создана на основе полупроводникового лазера (с длиной волны  $\lambda = 0,85$  мкм) и многоканального акустооптического модулятора света. Последний работает в режиме частотного синтеза голограмм [27]. Для повышения помехоустойчивости, скорости и плотности упаковки данных в голограмме применено 4-уровневое относительное фазовое кодирование. Путем кратковременной импульсной (единицы наносекунд) лазерной подсветки изображение голограммы переносится на фоточувствительную галоидосеребряную пленку диска. Воспроизведение голограммы и считывание ее содержимого осуществляется методом оптического фазочувствительного гетеродинамирования. Информационная емкость диска – 1 Гбайт. Расширение емкости памяти накопителя обеспечивалось за счет применения пакета из 4–8 дисков, а повышение скорости записи до 256–512 Мбит/с – за счет использования 4–8 параллельно работающих оптических головок.



**Рис. 2.** Изображение космического фотоснимка, полученное с экрана цветного ТВ-монитора (256×384). Цифровой массив этого изображения восстановлен из оптического цифрового архива.

Внешний вид лазерного накопителя на пакете из 4-х дисков с четырьмя параллельно работающими головками показан на рис. 4. Минимальное расстояние между дисками (высота головки) составляло 25 мм. К электромеханической системе, лазеру и



**Рис. 3.** Оптическая головка скоростного накопителя цифровых данных: а – оптическая схема; б – внешний вид. 1 – полупроводниковый лазер; 2 – микробъектив-коллиматор; 3 – четвертьволновая пластинка; 4, 5 – призмная формирующая система; 6 – цилиндрическая линза; 7 – акустооптический модулятор; 8 – плоскость предмета; 11 – фазовращающая пластинка; 9–12 – элементы отображающей оптической системы; 13 – плоскость изображения (диск).





**Рис. 4.** Лазерный скоростной накопитель цифровых данных на пакете из 4-х дисков.

акустооптическому модулятору накопителя предъявляются сравнительно низкие требования, что является несомненными достоинствами принятого физико-технического решения. Кроме того, оптическая головка накопителя обладает довольно высоким коэффициентом использования мощности полупроводникового лазера (~10%).

### *2.3. Основные результаты первого этапа исследований*

Из сказанного в пп. 2.1 и 2.2 следует, что в Новосибирске в 80-х годах прошлого столетия существовали не только все атрибуты технологии постоянной голографической памяти на плоском носителе (базовые технологии, элементы, физико-технические решения, результаты многолетних исследований и т. п.), но и действующие экспериментальные голографические системы памяти. Первая из них (архивная память) предназначалась для использования во внешнем контуре памяти ЭВМ, вторая, имеющая статус высокоскоростного накопителя данных, – в быстродействующих системах приема и передачи информации (волоконно-оптические линии связи, космическая телеметрия). Однако отсутствие реверсивной регистрирующей среды, а также сильный прогресс в альтернативных технологиях памяти, главным образом в магнитной и полупроводниковой, не оставил голографической памяти реальных шансов выхода на мировой рынок. На этом фоне стали отчетливо видны такие недостатки голографической памяти, как невозможность обеспечения записи и считывания данных в едином процессе, потеря ранее наблюдаемого преимущества в плотности упаковки данных, необратимость записей и т. п. В то же время, несмотря вскрывшиеся

недостатки технологии голографической памяти на плоских носителях, поиск и исследования в этой области были продолжены. Дальнейшие усилия исследователей принесли новые доказательства того, что потенциальные возможности технологии голографической памяти являются гораздо большими и обещающими.

### **3. Развитие технологии голографической памяти (1989 – 2007 гг.)**

Работы по поиску и созданию толстых голографических сред и, в том числе, опыты по записи в таких средах глубоких голограмм, начали проводиться в конце 60-х годов, т. е. практически сразу же после появления повышенного интереса к голографической памяти. Вначале для получения глубоких голограмм применялись имеющиеся щелочно-галоидные кристаллы [29] и кристаллы ниобата лития [30, 31]. Первые из них позволяли получать амплитудные (амплитудно-фазовые) объемные голограммы, вторые – фазовые. Однако в силу того, что естественный срок жизни таких голограмм был небольшим и, кроме того, голограммы ускоренно разрушались при считывании (на длине волны записи), интерес к таким материалам, как к средам для голографической памяти, пошел на спад. Начали проводиться работы по целенаправленному синтезу новых материалов. Примером может служить плодотворный цикл исследований, выполненных в конце 70-х – начале 80-х годов в ГОИ им. С.В. Вавилова [32–35]. Они завершились созданием толстой (1–3 мм) регистрирующей окисляющей среды с антраценом, названной “реоксаном” [35]. В 1987 году авторами среды “реоксан” экспериментальным путем было показано, что предельная плотность записи в такой среде на порядок превышает предельную плотность записи на плоских галоидосеребряных носителях [18]. Эксперимент проведен путем записи в среде 50 наложенных глубоких голограмм диффузно рассеивающих объектов.

Однако, несмотря на сказанное выше, начало очередного этапа развития голографической памяти следует, по-видимому, отнести к 1989 году, когда работы по памяти на плоском носителе в СССР были практически прекращены (в США такие работы прекращены гораздо раньше) и когда исследования в области толстых регистрирующих сред начали увязываться с новыми проектами развития технологии голографической памяти, но на этот раз трехмерной.

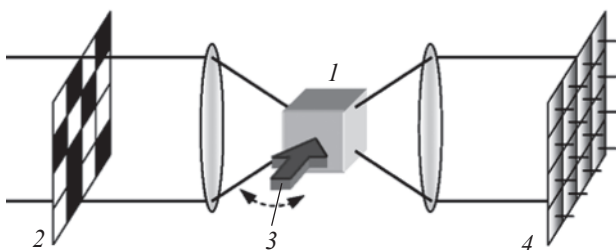
Потенциальные преимущества толстых сред, главным образом по плотности записи и помехоустойчивости хранения информации, намечалось обеспечить в процессе разработки технологии на-

ложенной голографической записи страниц данных и новой технологии многослойной записи информации, предложенной в 1989 году. Первая из них является странично-ориентированной, вторая – по-слово-ориентированной. Принцип действия первой из них предусматривает работу с отдельными информационными массивами в формате страниц  $N \times N$  бит, где  $N$  может принимать значение 1024 и более, а принцип действия второй – работу с отдельными двоичными словами. Запись и восстановление двухградационных страниц  $N \times N$  бит проводится в виде глубоких голограмм по всей толщине среды, а объемных микрорешеток – во многих глубинных слоях такой среды. Более подробно особенности каждой из сравниваемых технологий, которые выражаются, в частности, в различии требований к регистрирующим средам, рассмотрены ниже.

### 3.1. Наложенная голографическая запись

Общая схема 3D голографической памяти со страничной организацией данных и с записью страниц в одном и том же объеме регистрирующей среды изображена на рис. 5 [36]. Идея создания такой памяти, как следует из раздела 1, возникла в 1963 году и до сих пор остается актуальной. Это обусловлено ее принципиальными преимуществами – возможностью организации параллельных методов записи, хранения и выдачи данных в многопроцессорных компьютерных системах.

Суть такой технологии заключается в представлении исходной информации в формате бинарных страниц размером  $N \times N$  бит и параллельной голографической записи таких страниц. Запись страницы проводится в виде Фурье-голограмм с кодированной опорной волной (используется пространственное, угловое или спектральное кодирование) путем наложения  $10^2$ – $10^3$  таких голограмм в одном и том же объеме регистрирующей среды. В режиме



**Рис. 5.** Общая схема 3D голографической памяти с наложенной записью. 1 – объемная регистрирующая среда; 2 – страница данных  $N \times N$  бит; 3 – кодированный опорный пучок; 4 – фотоматрица  $N \times N$  фотодетекторов.

считывания селективно восстановленное с голограммы изображение страницы вводится в компьютер с помощью матрицы  $N \times N$  фотодетекторов. В случае углового кодирования каждой из наложенных голограмм соответствует свой угол падения считывающего пучка. При отклонении угла падения пучка от заданного значения на величину, равную угловой селективности голограммы, интенсивность восстановленного изображения падает до нуля.

Согласно [36] “идеальная” среда для голографической наложенной записи должна обеспечивать:

1. Возможность записи на каждой из  $X, Y$  позиций  $R$  наложенных голограмм, где число  $R$  определяется динамическим диапазоном изменения показателя преломления среды.

2. При последовательной записи наложенных голограмм световая энергия, требуемая для записи отдельной голограммы, должна быть постоянна и не зависеть от ее номера (реально эта энергия при увеличении  $R$  резко возрастает).

3. Возможность восстановления голограммы непосредственно после ее записи.

4. Фоточувствительность (при записи одной из голограмм) –  $1$ – $10$  мДж/см<sup>2</sup>. (Это значение получено путем расчета при следующих параметрах: емкость диска типового размера – 100 Гбайт, скорость записи – до 100 Мбит/с, емкость страницы данных – до 1 Мбит, время экспозиции – 10 мс, площадь голограммы – 1 мм<sup>2</sup>, мощность лазера – 50 мВт, плотность мощности в плоскости регистрирующей среды – 100 мВт/см<sup>2</sup>, дифракционная эффективность (ДЭ) одной голограммы – 0,1–1%.)

5. Область спектральной чувствительности: 400–700 нм.

6. Диапазон модуляции показателя преломления:  $10^{-3}$ – $10^{-2}$ .

7. Толщина регистрирующего слоя: 0,2–1,0 мм.

8. Спектральная интенсивность шума рассеяния в полосе пространственных частот, соответствующих спектру изображения страницы, – менее  $10^{-8}$  мм<sup>2</sup>.

9. Усадка толщины регистрирующей среды – менее 1%.

10. Сохранность среды до записи – 6 месяцев, после записи – не менее 10 лет.

11. Значение параметра  $M\#$ , характеризующего динамический диапазон регистрирующей среды, должно быть более 15 при толщине слоя 1 мм. Параметр  $M\#$  эквивалентен суммарной величине изменения переменной составляющей показателя преломления в результате записи  $R$  наложенных голограмм.

Характеристики современных регистрирующих сред, наиболее удовлетворяющих предъявляемым требованиям, рассмотрены ниже.

Рост активности зарубежных исследований в области 3D голографической памяти наблюдается

с 1994 года. Так, в это время в США при лидирующей роли *IBM Almaden Research Center (San Jose)*, начали работать два объединенных исследовательских коллектива из специалистов 12 промышленных, государственных и университетских организаций по реализации проекта создания голографической памяти со сверхплотной упаковкой данных. Первый из них – консорциум *PRISM (Photorefractive Information Storage Materials)* – ориентирован на поиск и исследование фоторефрактивных материалов, как голографических объемных сред для записи и хранения данных; второй – консорциум *HDSS (Holographic Data Storage Systems)* – на разработку архитектуры перспективной странично-организованной голографической памяти и ее элементной базы. Это мотивировалось необходимостью накопления, обработки и быстрой передачи сверхбольших объемов цифровых данных, с которыми человечество столкнется в XXI веке, например, в видео- или киноиндустрии.

Сведения о результатах исследования объемных наложенных голограмм на фоторефрактивных кристаллах в достаточно полном объеме приведены в работе [37]. В этом случае запись и восстановление данных проводились в формате страниц размера  $N \times N$ , при этом анонсируемая скорость обмена данными с внешними источниками на уровне 1 Гбит/с достигалась путем формирования страниц, у которых  $N = 1000$  и более. Поэтому успех реализации технологии наложенных голограмм существенно зависел не только от наличия подходящих фоторефрактивных материалов, но и от наличия уникальной элементной базы: управляемых от компьютера формирователей страниц и высокочувствительных фотоприемных матриц размера  $1000 \times 1000$  элементов с циклом полного обновления информации 1 мс. Кроме того, запись/восстановление страниц размера  $1000 \times 1000$  элементов на фоторефрактивных кристаллах осуществлялись только за счет применения достаточно мощных лазерных источников излучения. Оказалась ограниченной и номенклатура фоторефрактивных кристаллов, которые могли бы быть использованы при создании памяти. Наилучшее отношение сигнал/шум в режиме записи/восстановления страниц большого размера позволял получить только легированный железом ниобат лития. Уровень шумов рассеяния одновременно исследованных фотохромных стекол и фоторефрактивных полимеров был значительно большим.

Несколько позднее было признано, что наиболее пригодными для создания 3D голографической памяти сверхвысокой емкости являются фотополимерные материалы, которые не требуют мокрого процесса обработки, обеспечивают сравнительно большое фотоиндуцированное изменение показате-

ля преломления и обладают длительной сохранностью до и после записи голограмм.

Плодотворные исследования по самопроявляющимся фотополимерным материалам, обеспечивающим запись и восстановление голограмм в реальном времени, проведены в 1989–1990 годах фирмами *Polaroid* и *DuPont* (США). Первой из них создана фотополимерная среда *DHR-128* на основе полимерных матриц из поли(*N*-винилпирролидона) и смеси акрилата лития, акриловой кислоты, бисакриламида и Метиленового Голубого, а второй – фотополимерные среды серии *HRF (HRF-150, HRF-800)*, содержащие ароматические или алифатические акрилатные мономеры в ацетатбутиратцеллюлозе [38]. Дифракционная эффективность голограмм, записанных при экспозициях 3–5 мДж/см<sup>2</sup>, составляла 80–100%. Толщина фоточувствительных слоев находилась на уровне 100 мкм, а угловая селективность наложенных голограмм составляла 0,09°.

Результаты этих работ были использованы фирмой *Aprilis* (США), создавшей малоусадочную фотополимерную среду *MDH-120* на основе кремнийорганических мономеров с катионной фотополимеризацией и открытых радикально-полимеризующихся мономеров. Толщина среды составляла 0,2–0,5 мм [38]. Фирма *Aprilis* объявила о разработке на основе такого материала толщиной 0,5 мм голографического диска с емкостью более 100 Гбайт и скоростью считывания 750 Мбит/с.

И, наконец, следует также упомянуть о малоусадочном материале фирмы *Lucent Technologies* (США) [36], который состоит из пред-полимера, инициатора и двух мономеров. Один из мономеров в процессе экспонирования обеспечивает изменение показателя преломления среды, а другой мономер, распадаясь, – компенсирует изменение объема, обусловленное полимеризацией первого. В 2001–2006 годах характеристики этого материала, в частности по толщине и усадке, были существенно улучшены фирмой *InPhase Technologies* (вышла из *Lucent Technologies*). Согласно [39], параметр  $M\#$  этого материала превышает значение 20, его фоточувствительность ( $Dn/(mJ/cm^2)$ ) равна  $9 \times 10^{-6}$ , толщина более 1 мм, а значение усадки менее 0,1%. На основе фотополимерного материала толщиной 1,5 мм фирма планирует создать к 2009 году 3D голографическую память емкостью 1,6 Тбайт и скоростью выдачи данных 120 Мбайт/с.

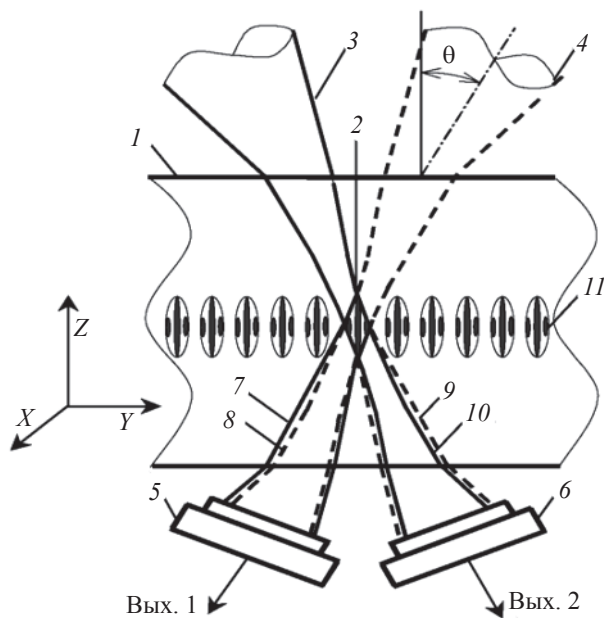
Наметившиеся успехи в создании толстых фотополимерных сред позволили ведущим научным группам США в 1994–1998 годах перейти к разработке методов построения и архитектуры 3D голографической памяти, главным образом на оптическом диске, и к рассмотрению вопросов скоростного обмена данными с компьютерами [40–42]. В доста-



точно полном виде обзор достижений по технологии наложенной записи страниц данных представлен в работах [43, 44]. В частности, здесь представлено несколько сценариев применения такой технологии: для создания динамической памяти на кристаллах (DRAM) емкостью 25 Гбайт, памяти с прямой записью/выборкой данных (DASD) емкостью 1 Тбайт и постоянной памяти (CD ROM) емкостью 1 Тбайт. Отмечен также перспективный комбинированный сценарий расширения емкости голографической памяти до 1 Петабайта.

### 3.2. Многослойная голографическая запись

Патент на метод многослойной записи микроголограмм (микрорешеток) в толстой среде получен в 1992 году И.Ш. Штейнбергом и Ю.А. Щепеткинским [45]. Метод основан на использовании двух когерентных сфокусированных пучков света: опорного 3 и гетеродинного 4 [46]. Эти пучки, как показано на рис. 6, пространственно совмещаются в произвольном слое 11 объемной среды 1, в результате чего в микрообъеме этой среды записывается интерференционная решетка 2. Решетки в других слоях записываются путем перемещения зоны пересечения 2 пучков по глубине среды 1.



**Рис. 6.** Схема многослойной лазерной записи и коллинеарного гетеродинного детектирования микрорешеток в объеме среды. 1 – регистрирующая объемная среда; 2 – интерференционная микрорешетка (микроголограмма); 3 – опорный пучок; 4 – гетеродинный пучок; 5, 6 – фотоприемники; 7–10 – световые пучки, полученные в результате дифракции на микрорешетке 2; 11 – адресуемый слой среды.

Для селекции зоны микрорешетки в объеме регистрирующей среды 1 используется метод коллинеарного гетеродинирования [47], суть которого состоит в том, что при воспроизведении информации частота света гетеродинного пучка 4 сдвигается на  $\omega_r$  относительно частоты опорного пучка 3, и бегущая интерференционная решетка, образовавшаяся в зоне пересечения пучков 3 и 4, совмещается с решеткой 2, записанной в адресуемом слое 11. Световые пучки 7 и 9 получают в результате дифракции на решетке 2 пучков 3 и 4 соответственно. Вследствие точного совпадения пространственных частот бегущей и записанной интерференционных решеток пучок 7 будет распространяться в одном направлении (коллинеарно) с пучком 4, а пучок 9 будет коллинеарен пучку 3. В результате взаимодействия двух коллинеарных пучков с различными частотами света на выходах фотоприемников 5 и 6 появится фототок с разностной частотой  $\omega_r$ , несущий информацию о выходном сигнале.

Гетеродинное детектирование обеспечивает высокую помехозащищенность по отношению к шумам рассеяния оптических элементов и материала среды, поскольку считывание происходит только в зоне пересечения опорного и гетеродинного пучков света, т. е. там, где локализуется бегущая интерференционная решетка. Эти пучки перекрываются только в зоне записи/считывания 2, так, как показано на рис. 6. Шумы рассеяния оптических элементов, блики и переотражения мало влияют на результат детектирования.

Метод гетеродинного детектирования обладает уникальной возможностью восстанавливать не только амплитуду, но и, что важно для дальнейшего рассмотрения, фазу дифракционной решетки. Это позволяет двоичное значение числа записывать путем модуляции фазы микрорешетки-пита, т. е. применить фазовый способ кодирования [48]. Последний, как известно, обеспечивает более высокую помехозащищенность, чем амплитудное кодирование с пассивным нулем, когда логической единице соответствует наличие света, а логическому нулю – его отсутствие. Фазовое представление информации в микрорешетке позволяет относительно просто реализовать 8-уровневое кодирование (трехразрядное двоичное слово) и тем самым осуществить запись данных с плотностью, превышающей дифракционное разрешение оптической системы. Экспериментальное значение порога чувствительности гетеродинного детектирования находится на уровне  $10^{-10}$  мм<sup>2</sup> (шумы термически полированного стекла) [49].

Размер зоны локализации интерференционной структуры по толщине среды (вдоль оси Z), определяемый по уровню  $1/e^2$  максимальной мощности,



$\Delta z = 2r_0 n / \sin\theta$ , где  $r_0$  – размер сфокусированного гауссового пучка,  $n$  – коэффициент преломления светочувствительного материала, а  $2\theta$  – угол между осями пучков (при  $n = 1$ ). Пространственная частота микрорешетки  $\nu = 2\sin\theta/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения. Отсюда следует, что  $\Delta Dz = 4r_0 n / \nu \lambda$ .

Если, например,  $2r_0 = 2$  мкм,  $\nu = 1000$  1/мм,  $\lambda = 0,67$  мкм,  $n = 1,5$ , то  $\Delta z = 9$  мкм. Из этого следует, что в среде толщиной порядка 1 мм можно записать не менее 100 слоев.

Запись информации во многих слоях позволяет получить высокую объемную плотность упаковки данных и, соответственно, высокую емкость памяти, не переходя к предельно малому размеру “пита”, так как при этом резко возрастают требования к точности фокусировки пучков, и усиливается влияние аберраций оптической системы. Стандартные микрообъективы рассчитаны на работу с покровным стеклом определенной толщины, обычно 170 мкм. Отклонение толщины среды от этой величины приводит к появлению сферической аберрации. В условиях многослойной записи проводится последовательная фокусировка пучков во всех слоях среды, толщина которой может достигать 1 мм. Волновой фронт пучка искажается, при этом величина искажений пропорциональна отклонению толщины среды в зоне записи от размера 170 мкм. Для исключения такой аберрации необходимо применять специальную оптику.

В ранних системах голографической памяти использовались регистрирующие среды с линейным поглощением. Чувствительность среды определялась поглощенной энергией, которая обычно была соизмеримой с падающей. В случае многослойной организации памяти линейное поглощение не позволяет проводить однородную по глубине запись.

В [49] показано, что в случае записи микрорешеток в  $R$  слоях требования к динамическому диапазону изменения показателя преломления среды  $\Delta n$  увеличиваются в  $R$  раз. Так, например, если необходимо записать микрорешетки в 10–100 слоях (при толщине слоя 10 мкм) с дифракционной эффективностью  $\sim 1\%$ , то из известной формулы Когельника для дифракционной эффективности объемных голограмм следует, что амплитуда модуляции показателя преломления в каждом слое должна составлять  $\Delta n \approx 2 \times 10^{-3}$ . Тогда общий диапазон изменения показателя преломления должен составлять  $\Delta n \approx 2 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-1}$ . Материалы типа ниобата лития ( $\Delta n \approx 3 \times 10^{-3}$ ) и “реоксана” ( $\Delta n \approx 5 \times 10^{-3}$ ) этим требованиям не удовлетворяют.

Одним из путей преодоления противоречия между чувствительностью одного слоя и общим числом слоев регистрирующей среды является использова-

ние механизма двухфотонного поглощения [50]. Этот механизм позволит, по-видимому, решить основные проблемы многослойной записи: обеспечить однородную запись во всем объеме регистрирующей среды и неразрушающее считывание на длине волны записи. Кроме того, за счет применения сред с квадратичным по интенсивности откликом можно уменьшить размер регистрируемого “пита”, а также снизить требования к динамическому диапазону изменения показателя преломления. Регистрирующая среда при этом должна иметь следующие параметры [36]:

1. Фоточувствительность – не менее  $10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup> (это значение получено при условии, что скорость записи – не более 100 Мбит/с, площадь микрорешетки – 1,7 мкм<sup>2</sup>, дифракционная эффективность – 0,1–1%, мощность излучения – 50 мВт (фемтосекундный лазер) и 10 мВт (наносекундный лазер));

2. Область спектральной чувствительности – 370–420 нм (фемтосекундный лазер) и 350 нм (наносекундный лазер);

3. Диапазон модуляции показателя преломления в слое – не менее  $10^{-3}$ ;

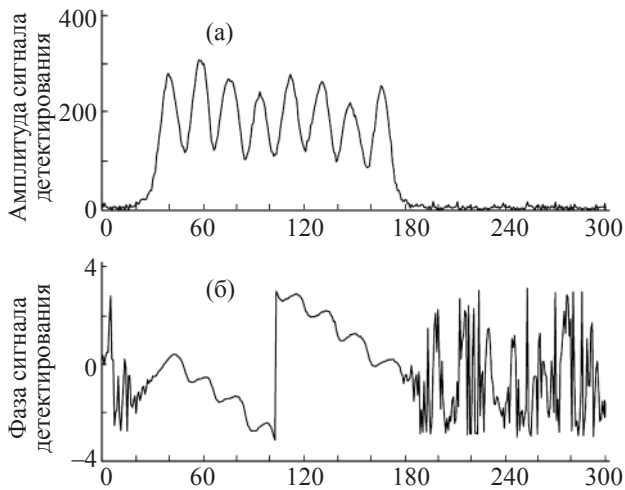
4. Толщина среды – 1 мм (100 слоев по 10 мкм каждый).

Обзор современных исследований по фотополимерным материалам с двухфотонным поглощением приведен в [36]. Получены первые обнадеживающие результаты.

Успешные эксперименты по однофотонной записи/гетеродинного детектирования микрорешеток в 7–8 слоях толстых галоидосеребряных материалов и других сред проведены в 1993–1994 годах. Расстояние между слоями находилось на уровне 10 мкм. Это позволило в 1995–1997 годах создать макет скоростного лазерного 3D накопителя данных на оптическом диске (при финансовой поддержке Российского фонда технологического развития РФ). Скорость записи цифровых данных на вращающийся диск, равная 256 Мбит/с, обеспечивалась за счет введения дополнительной акустооптической развертки сфокусированных лазерных пучков по радиусу диска. Результаты, полученные при выполнении этого проекта, подробно изложены в [49].

Потенциальные возможности двухпучкового лазерного метода однофотонной и двухфотонной записи/гетеродинного детектирования микрорешеток в глубинных слоях толстой среды изучены в Институте автоматики и электрометрии в 2004–2006 годах после создания специализированного экспериментального стенда, обеспечивающего прецизионное трехкоординатное перемещение среды относительно оптической головки [51, 52].

В качестве среды использовался легированный железом ниобат лития с размерами  $8 \times 8 \times 0,9$  мм<sup>3</sup>.



**Рис. 7.** Амплитуда (а) и фаза (б) сигнала детектирования 8 микрорешеток на глубине 20–180 мкм. Фаза каждой из микрорешеток сдвинута на  $\pi/4$  по отношению к предыдущей.

Оптическая ось кристалла располагалась параллельно поверхности образца и плоскости падения интерферирующих пучков. Выбрана необыкновенная поляризация записывающих и считывающих пучков. Источник излучения – импульсный полупроводниковый лазер с длиной волны  $\lambda = 0,67$  мкм (длительность импульса 2 нс) и частотой повторения импульсов 5 МГц. Мощность излучения в импульсе на поверхности образца составляла 2 мВт, а интенсивность света в плоскости записи –  $1,6 \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. Механизм записи – однофотонный. Время экспонирования составляло 0,5–1 с ( $2,5\text{--}5 \times 10^6$  импульсов). Размер микрорешетки, сформированной в плоскости среды, составлял  $1 \times 1,4$  мкм<sup>2</sup>, контраст – 0,85, а пространственная частота –  $1130$  мм<sup>-1</sup>. Расчетное значение размера микрорешетки по глубине среды с показателем преломления  $n = 2,26$  составляло

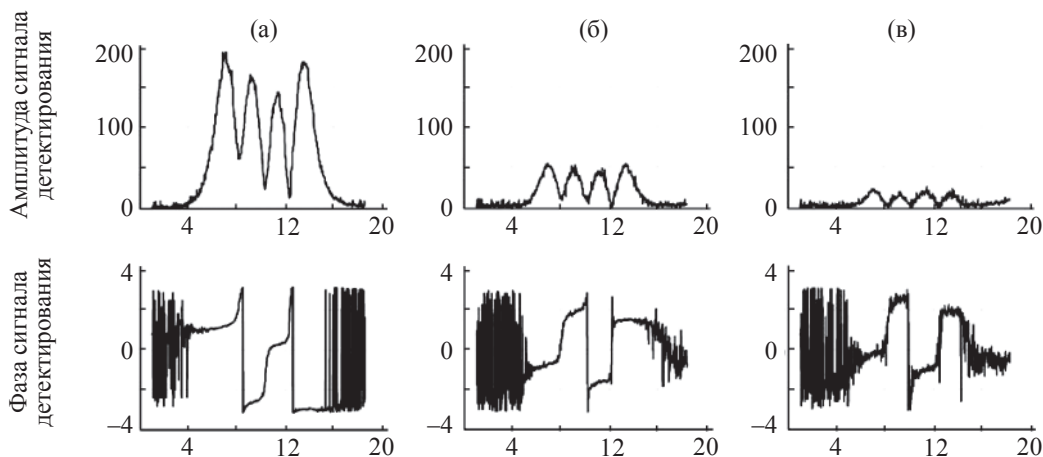
8,5 мкм. Максимальное значение ее дифракционной эффективности – 2,5%. Такая эффективность соответствует амплитуде модуляции показателя преломления  $\sim 3 \times 10^{-3}$ , что является предельной величиной для легированного железом ниобата лития.

Для проверки возможности реализации 8-уровневого фазового кодирования на глубинах 20–180 мкм в ниобате лития проведена запись строки из 8 микрорешеток, причем фаза каждой последующей микрорешетки сдвигалась на  $\pi/4$  относительно предыдущей. Характер изменения амплитуды сигнала детектирования при сканировании зоны пересечения световых пучков вдоль оси  $Z$  приведен на рис. 7а. Характер изменения фазы этого сигнала показан на рис. 7б. Можно видеть, что все 8 уровней фазы хорошо различаются.

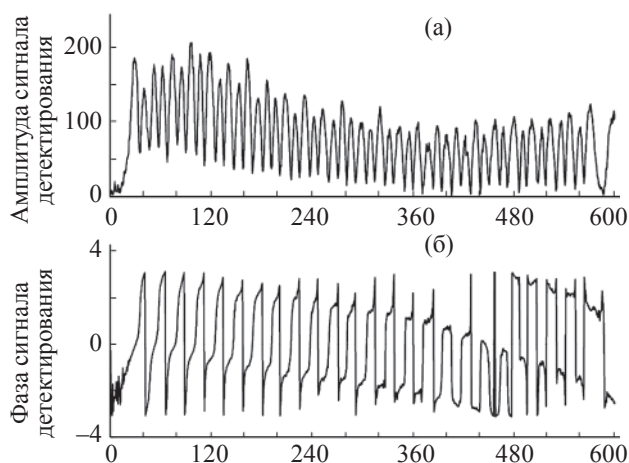
Для подтверждения ранее высказанного тезиса о том, что фазомодулированный сигнал является более помехоустойчивым по сравнению с амплитудномодулированным, проведены запись и детектирование последовательности из 4 микрорешеток в одном из слоев ниобата лития. Характер изменения амплитуды и фазы сигнала после проведения последовательных циклов детектирования при двухуровневом фазовом кодировании показан на рис. 8а–8в. Видно, что, несмотря на падение амплитуды сигнала (стирание при детектировании) более чем на порядок, характер изменения фазы остается постоянным.

Проведена также глубинная запись матриц микрорешеток размером  $5 \times 5$ . Расстояние между микрорешетками по оси  $X$  составляло 5 мкм, а по оси  $Y$  – 4 мкм. Матрицы размещались вдоль оси  $Z$  на расстоянии 40 мкм друг от друга.

С целью оценки предельных возможностей двухпучкового метода записи/детектирования модифицированных состояний среды проведена запись микрорешеток в 50 глубинных слоях ниобата ли-



**Рис. 8.** Амплитуды и фазы сигналов после нескольких последовательных циклов детектирования (а–с).



**Рис. 9.** Амплитуда (а) и фаза (б) сигнала детектирования 50 микрорешеток, записанных по глубине ниобата лития, легированного железом. Разность фаз между соседними микрорешетками равна  $\pi$  рад.

тия. Число слоев было ограничено малым рабочим отрезком фокусирующего микрообъектива. Расстояние между слоями в среде составляло 12 мкм. Сдвиг фаз между двумя соседними микрорешетками был равен  $\pi$  радиан. На рис. 9а показана зависимость амплитуды сигнала считывания при сканировании зоны пересечения световых пучков 10, 11 (рис. 6) по глубине среды. Характер изменения фазы этого сигнала показан на рис. 9б.

Двухпучковый лазерный метод записи/детектирования микрорешеток проверен также на образцах толстых фотополимерных композиций, разработанных в Новосибирском институте органической химии СО РАН. Толщина образцов находилась в пределах от 100 до 180 мкм. Найдена композиция, обеспечившая запись в режиме однофотонного поглощения объемных микрорешеток (размеры  $1 \times 1,4 \times 5,7$  мкм<sup>3</sup>) последовательностью импульсов длительностью 2 нс за время 50 мкс. Минимальное значение фоточувствительности композиции составляет 10 мДж/см<sup>2</sup> при дифракционной эффективности микрорешеток, равной 0,18%. Реализована запись 10 микрорешеток в фотополимерном материале, толщиной 150 мкм. Расстояние между микрорешетками – 15 мкм.

Следует также отметить и накопленный опыт глубокой двухфотонной записи микрорешеток в чистом ниобате лития и фотополимерных материалах [52].

### 3.3. Основные результаты второго этапа исследований

Сведения, приведенные в пп. 3.1 и 3.2, позволяют сделать вывод о том, что в период 1989–2007 гг. существенное развитие получили две технологии 3D

голографической памяти: технология записи двоичных страниц данных большого размера в виде глубоких наложенных голограмм и технология многослойной записи двоичных слов в виде объемных микрорешеток. Как первая, так и вторая технологии базируются на использовании толстых регистрирующих сред, правда, с отличающимися требованиями.

Наиболее развитой и продвинутой является технология записи наложенных объемных голограмм. Это стало возможным благодаря большому прогрессу в области создания малоусадочных фотополимерных материалов с сухим проявлением толщиной до 1–2 мм. Материалы обеспечивают сравнительно большое фотоиндуцированное изменение показателя преломления (до  $9 \times 10^{-6} \Delta n/(mJ/cm^2)$ ) и вместе с такими параметрами, как динамический диапазон изменения показателя преломления, фоточувствительность, толщина и светорассеяние и т. п., позволяют рассматривать их в качестве рабочей регистрирующей среды. Наибольший вклад в развитие технологии создания таких сред внесли фирмы *Polaroid*, *DuPont*, *Aprilis*, *Lucent Technologies* и *InPhase Technologies* (все США), при этом некоторые из них (*Aprilis*, *InPhase Technologies*) объявили о создании на их основе терабайтных оптических дисков. Существуют также возможности создания перезаписываемых оптических дисков емкостью 25 Гбайт на кристаллах в статусе динамической памяти.

Что касается технологии многослойной записи микрорешеток, то она находится в настоящее время в стадии “созревания”. Ожидается, что большие потенциальные возможности такой технологии будут экспериментально подтверждены после разработки толстых (1–2 мм) регистрирующих сред, в частности малоусадочных фотополимерных, с высоким коэффициентом двухфотонного поглощения и после освоения фемтосекундных лазерных методов локальной фотомодификации таких сред в 100 и большем количестве глубинных слоев.

## 4. Заключение

Ю.Н. Денисюк в одной из своих научных публикаций писал: “Переход от плоскости к трехмерному пространству не только расширил сферу исследований, но и одновременно предопределил переход голографии из области инструментальной оптики в область физики” [53]. По аналогии с этой мыслью в заключении можно сказать, что “переход” голографической памяти с плоской регистрирующей среды на объемную среду потребовал дальнейшего смещения профессиональных интересов исследователей из чисто физической области в область на стыке физи-

ки и фотохимии. Результаты исследований, представленные в настоящем обзоре, являются, по мнению автора, лучшим подтверждением этого тезиса.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить Е.Ф. Пена, В.В. Шелковникова и А.Ю. Беликова за большую помощь при подготовке этой статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-07-89114-а) и Президиума СО РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 17).

## Литература

1. *Gabor D.* A new microscopic principle // *Nature*. 1948. V. 761. № 161. P. 777–779.
2. *Leith E.N., Upatnieks J.* Reconstructed wavefronts and communication theory // *Journal of the Optical Society of America*. 1962. V. 52. P. 1123–1130.
3. *Денисюк Ю.Н.* Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Доклады АН СССР. 1962. Т. 144. С. 1275–1278.
4. *Van Heerden P.J.* Theory of optical information storage in solids // *Applied Optics*. 1963. V. 2. № 4. P. 393–400.
5. *Аристов В.В., Шехтман В.Ш.* Свойства трехмерных голограмм // *Успехи физических наук*. 1971. Т. 104. № 1. С. 51–76.
6. *Денисюк Ю.Н.* Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // *Оптика и спектроскопия*. 1963. Т. 15. № 4. С. 522–532.
7. *Денисюк Ю.Н.* Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения (часть 2) // *Оптика и спектроскопия*. 1965. Т. 18. № 2. С. 276–281.
8. *Gabor D.* Character recognition by holography // *Nature*. 1965. V. 208. P. 422–423.
9. *Gabor D.* Associative holographic memories // *IBM Journal of Research and Development*. 1969. V. 13. P. 156–159.
10. *Smits F.M., Gallaher L.E.* Design considerations for semi-permanent optical memory // *Bell System Technical Journal*. 1967. V. 46. P. 1267–1278.
11. *Anderson L.K.* Optical memory for bulk data storage // *Bell Laboratories Record*. 1968. V. 46. P. 318–325.
12. *Микаэлян А.Л., Бобринев В.И., Наумов С.М., Соколова Л.С.* Возможности применения методов голографии для создания новых типов запоминающих устройств // *Радиотехника и электроника*. 1969. № 1. С. 115–123.
13. *Выдрин Л.В., Гибин И.С., Пен Е.Ф. и др.* Голограммное запоминающее устройство, взаимодействующее с ЭВМ // *Автометрия*. 1974. № 1. С. 3–9.
14. *Гибин И.С., Мантуш Т.Н., Нестерихин Ю.Е. и др.* Программируемое голограммное ЗУ с записью и считыванием информации // *Автометрия*. 1975. № 3. С. 3–11.
15. *Блок А.А., Домбровский В.А., Домбровский С.А. и др.* Экспериментальное исследование достоверности считывания данных в голографических ЗУ // *Автометрия*. 1984. № 3. С. 32–35.
16. *Домбровский В.А., Домбровский С.А., Пен Е.Ф.* Исследование помехоустойчивости голограмм в ГЗУ // *Автометрия*. 1985. № 4. С. 61–70.
17. *Домбровский С.А.* Оценка эффективности применения корректирующих кодов в голографических ЗУ // *Автометрия*. 1989. № 2. С. 62–68.
18. *Блок А.А., Домбровский В.А., Домбровский С.А. и др.* Практический предел плотности записи данных в голографических ЗУ на плоских носителях // *Препринт*. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1988.
19. *Гибин И.С., Гофман М.А., Пен Е.Ф. и др.* Ассоциативная выборка информации в голограммных запоминающих устройствах // *Автометрия*. 1973. № 5. С. 12–18.
20. *Гибин И.С., Гофман М.А., Пен Е.Ф. и др.* Голограммные ЗУ с функциями поиска информации // *Автометрия*. 1977. № 5. С. 37–51.
21. *Коняев С.И., Кибирев С.Ф., Наймарк С.И.* Фотоматричный ассоциативный накопитель // *Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ*. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
22. *Pankov V.N., Tverdochleb P.E.* Parallel associative VLSI processor with optical input // *Proceedings ICOESE 90 International Conference on Optoelectronic Science and Engineering*. SPIE. 1990. V. 1290. P. 662.
23. *Выдрин Л.В., Вьюхина Н.Н., Гибин И.С. и др.* Экспериментальная оптико-электронная (голографическая) система памяти // *Автометрия*. 1980. № 2. С. 60–67.
24. *Блок А.А., Ванюшев Б.А., Васильев А.М. и др.* Устройство автоматической записи матриц голограмм // *Автометрия*. 1980. № 2. С. 68–73.
25. *Твердохлеб П.Е.* Голографическая память и информационные машины // *Автометрия*. 1980. № 2. С. 9–24.
26. *Вовк Ю.В., Выдрин Л.В., Вьюхина Н.Н. и др.* Высокоскоростной накопитель цифровых данных на основе пакета оптических дисков // *Автометрия*. 1989. № 3. С. 82–94.
27. *Вовк Ю.В., Щепеткин Ю.А.* Использование частотного разделения сигналов при записи одномерных голограмм излучения полупроводниковых лазеров // *Автометрия*. 1981. № 1. С. 40–45.
28. *Вовк Ю.В., Щепеткин Ю.А.* Параллельное гетеродинное считывание двоичных данных из одномерных голограмм Фурье // *Автометрия*. 1984. № 3. С. 35–42.
29. *Шварц К.К., Готтлиб В.И., Кристансон Я.Ж.* Оптические регистрирующие среды // *Рига: Знание*, 1976. С. 48.
30. *Chen S.F., La Maccia J.T., Fraser D.B.* Holographic storage in lithium niobate // *Applied Physics Letters*. 1968. V. 13. № 7. P. 223.
31. *Суханов В.И., Ащеулов Ю.В., Петников А.Е.* Запись и считывание голограмм в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$  // *Оп-*



- тическая голография / Под ред. Денисюка Ю.Н. Л.: Наука, 1979. С. 64.
32. Лашков Г.И., Суханов В.И. Использование дисперсионной фоторефракции, обусловленной процессами с участием триплетных состояний, для регистрации фазовых трехмерных голограмм // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 44. № 5. С. 1008–1015.
  33. Лашков Г.И., Бодунов Е.Н. Реакции сенсibilизированного фотоокисления в фазовой регистрации оптического изображения // Оптика и спектроскопия. 1979. Т. 47. № 6. С. 1126.
  34. Суханов В.И., Петников А.Е., Ащеулов Ю.В. Запись голограмм во встречных пучках на органическом материале “Реоксан” // Оптическая голография / Отв. ред. Денисюк Ю.Н. Л.: Наука, 1983. С. 56.
  35. Суханов В.И. Трехмерные глубокие голограммы и материалы для их записи // Оптический журнал. 1994. № 1. С. 61–70.
  36. Твердохлеб П.Е., Коронкевич В.П., Косцов Э.Г. и др. 3D лазерные информационные технологии // Отв. ред. Твердохлеб П.Е. Новосибирск: ЗАО ИПП “Офсет”, 2003. С. 54.
  37. Bernal M.-P., Burr G.W., Coufal H., and all. Holographic data storage materials // MRS Bulletin. 1996. V. 21. № 9. P. 51–60.
  38. Барачевский В.А. Фотополимеризующиеся регистрирующие среды для трехмерной голографической оптической памяти // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 3. С. 1–12.
  39. Wilson W.L. High performance data storage via volume holography // <http://www.thic.org/pdf/Jun02/inphase.wwilson.020611.pdf>
  40. Heanue J.F., Bashaw M.C., Hesselink L. Volume holographic storage and retrieval of digital data // Science. 1994. V. 265. P. 749.
  41. Hong J.H., McMichael I., Chang T.Y., Christian W., Paek E.G. Volume holographic memory systems: techniques and architectures // Optical Engineering. 1995. V. 34. P. 2193–2203.
  42. Psaltis D., Burr G.W. Holographic data storage // Computer. 1998. V. 31. № 2. P. 52–60.
  43. Ashley J., Bernal M.-P., Burr G.W., Coufal H. and all. Holographic data storage // IBM Journal of Research and Development. 2000. V. 44. P. 341–368.
  44. Orlov S.S., Phillips W., Bjornson E., Takashima Y. and all. High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system // Applied Optics. 2004. V. 43. № 25. P. 4902–4914.
  45. Штейнберг И.Ш., Щенеткин Ю.А. Способ многослойной оптической записи и воспроизведения двоичной информации // Авторское свидетельство № 1769233. Бюллетень изобретений. 1992. № 38.
  46. Рудаков И.Б., Штейнберг И.Ш., Щенеткин Ю.А. Метод многослойной оптической записи информации // Автометрия. 1991. № 3. С. 76.
  47. Карлтон Х., Мэлони В., Мелц Г. Коллинеарное гетеродинамирование в оптических процессорах // ТИИЭР. 1969. V. 57. № 5. С. 32–40.
  48. Штейнберг И.Ш., Щенеткин Ю.А. Особенность 3D оптической записи двоичной информации // Автометрия. 1993. № 3. С. 89.
  49. Твердохлеб П.Е., Щенеткин Ю.А., Штейнберг И.Ш. Многослойная оптическая память // 3D лазерные информационные технологии / Отв. ред. Твердохлеб П.Е. Новосибирск: ЗАО ИПП “Офсет”, 2003. С. 110–167.
  50. Steinberg I.Sh., Shepetkin Ju.A. Multilayer three-dimensional optical recording // Proceedings Second International Conference on Optical Information Processing. SPIE. 1996. V. 2969. P. 232–236.
  51. Беликов А.Ю., Вьюхина Н.Н., Затолокин В.Н., Твердохлеб П.Е. и др. Экспериментальные исследования процессов лазерной записи и гетеродинамного детектирования микроструктур в объеме регистрирующих сред // Автометрия. 2007. Т. 43. № 1. С. 76–90.
  52. Штейнберг И.Ш., Щенеткин Ю.А. Исследование возможности использования двухфотонной записи микроголограмм в фоторефрактивных кристаллах для создания трехмерной памяти // Материалы научно-практической конференции “Голография в России и за рубежом. Наука и практика”. Москва, 2006. С. 76–78.
  53. Денисюк Ю.Н. Некоторые проблемы и перспективы голографии в трехмерных средах // Оптическая голография / Перевод с англ. под ред. Гуревича С.Б. М.: Мир, 1982. Т. 2. С. 691–729.