

***Юрий Николаевич Денисюк - основоположник трехмерной
оптической голографии. Как это было. К пятидесятилетию
открытия физического явления.***

Д.И. Стаселько

Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Оптическое общество

им. Д.С. Рождественского

E-mail: dmitry@staselko.spb.ru

***Введение: исторический фон и роль голографии в формировании
нового облика оптики***

Начало второй половины 20-го столетия явилось временем революционных свершений в такой, казалось бы, устоявшейся к тому времени области науки, как оптика. Решающую роль в нем сыграли три открытия: 1) создание лазеров – источников высококогерентного и одновременно мощного излучения оптического диапазона; 2) нелинейной оптики как результата действия такого излучения на вещество и 3) оптической голографии как наиболее полного способа регистрации пространственно-временных характеристик волновых полей различной природы.

Среди них наиболее продвинутым с точки зрения широты применений, несомненно, оказалось создание лазеров на основе явления вынужденного излучения света, существование которого обосновал А. Эйнштейн в 1917 году [1]. А первая лазерная генерация света была получена американским физиком Теодором Мейманом в 1960 году при возбуждении кристаллов рубина [2]. В минувшем году полувековой юбилей лазерной эры в оптике с подобающим размахом был отмечен во всем мире.

Первый отечественный обзор, посвященный лазерам, был опубликован Леонидом Дмитриевичем Хазовым в начале 1961 года [3]. Им же был создан и испытан 2 июня 1961 года в ГОИ им. С.И. Вавилова первый отечественный лазер, также на рубине [4], что положило начало отечественному лазеростроению.

Впервые представление о нелинейных явлениях в оптике, связанных, в частности, с наблюдаемым насыщением поглощения света в урановом стекле было сформулировано советским ученым С.И. Вавиловым в его монографии «Микроструктура света» в 1950 году [5]. Он же назвал это направление нелинейной оптикой. Однако сравнительно невысокий уровень мощности излучения долазерных источников света долгое время не позволял получить результаты, которые вызвали бы интерес к разработке теории и практическому использованию нелинейно-оптических явлений.

Разработка чрезвычайно мощных импульсных газоразрядных источников света позволила в конце пятидесятих годов прошлого века наблюдать ярко выраженное насыщение поглощения света в кристаллах рубина, что привело в 1960 году к первым демонстрациям инверсии населённости энергетических уровней ионов хрома в рубине в оптической области и, очень скоро, к лазерной генерации.

Следующим этапом в развитии нелинейной оптики явилась демонстрация нелинейности существенно иного рода – нелинейности оптической восприимчивости, связанной с зависимостью от интенсивности возбуждающего света уже не населённостей энергетических подуровней оптических центров, а с зависимостью от интенсивности света вероятностей оптических переходов. Этот новый тип нелинейности замечателен безынерционностью отклика, что было блестяще продемонстрировано в замечательном эксперименте 1961 года, когда американский профессор П. Франкен пропустил сфокусированный луч только что созданного рубинового лазера через кристалл кварца и обнаружил следы генерации второй гармоники возбуждавшего кристалл излучения [6].

Это открытие сразу привлекло всеобщее внимание, став наиболее эффективным, простым и доступным путем продвижения генерации высококогерентного излучения в коротковолновую область спектра. Общеизвестный вклад в разработку теории нелинейно-оптического преобразования частоты излучения лазерных пучков, а также в создание на ее основе перестраиваемых по частоте параметрических генераторов света внесли отечественные физики из МГУ академик Рэм Викторович Хохлов и профессор Сергей Александрович Ахманов с сотрудниками [7]. Важную роль в развитии приложений нелинейной оптики, связанных прежде всего с лазерным управлением движением атомов и молекул, включая оптическое охлаждение и формирование атомных пучков, а также лазерное разделение изотопов, сыграли исследования, проведенные в ИСАН под руководством профессора Владилена Степановича Летохова [8].

Что касается голографии, то истории ее возникновения и развития к настоящему времени посвящен ряд работ и исследований, включая труды ее основоположников, а также специальных научных сессий [9-11]. Общеизвестно, что основополагающий вклад в голографию был сделан в пионерских работах Денниса Габора, стремившегося улучшить качество изображений, создаваемых электронным микроскопом, путем перевода поля электронной волны в оптический диапазон, поскольку здесь опыт и методы борьбы с волновыми aberrациями пучков были гораздо более успешными.

Таким образом, он впервые поставил вопрос о практическом использовании фундаментального факта единства волновых полей различной природы. Одновременно он решил вопрос о принципиальной возможности одновременной регистрации на плоскости

амплитуды и фазы волнового поля излучения, которое проходит сквозь объект, содержащий в себе оптическую информацию, с последующим восстановлением этого поля и информации об объекте путем освещения полученной интерференционной картины.

Именно в идее восстановления волнового поля с целью извлечения содержащейся в ней оптической информации об объекте, по нашему мнению, и состоял фундаментальный вклад Габора в проблему изучения и использования волновых полей света. С точки зрения экспериментальной реализации голографический эксперимент Габора по сути представлял собой расширенный вариант двухлучевой классической интерферометрии «в полосах бесконечной ширины» с искаженным дифракцией объектным пучком.

Этот метод был назван им голографией, или полной записью волнового поля, и реализован экспериментально с помощью фотографических материалов в видимой области спектра [12, 13].

Принято также полагать, что принципиально важным и даже решающим фактором последующего развития голографии явилось изобретение лазеров и получение американскими учеными Эмметом Лейтом и Юрисом Упатниексом внеосевых пропускающих голограмм.

Действительно, благодаря использованию лазера, обладающего несравнимо более высокой степенью пространственно-временной когерентности излучения, необходимой для высококонтрастной качественной записи интерференционных картин и одновременно с этим высокой мощностью, а также введению в схему записи наклонного опорного пучка, широко используемого в классической интерферометрии «в полосах конечной ширины», они сумели получить объемные изображения ряда сцен, в том числе сцены шахматной доски с расставленными на ней фигурками, которые привлекли внимание исследователей и широкой публики к достижениям голографии. Э. Лейт и Ю. Упатниекс в 1961-1962 гг. опубликовали идею и теорию голограмм с боковым опорным пучком, перенесенную ими, как и Д. Габором, в оптический диапазон частот из инфракрасного, на сей раз уже гораздо более длинноволнового СВЧ-диапазона [14]. Через два года они реализовали свою схему в экспериментах по записи и воспроизведению первых внеосевых голограмм. Сначала это были голограммы плоских пропускающих транспарантов с диффузной подсветкой, а затем и трехмерных диффузно рассеивающих предметов [15].

Далее в большинстве работ отмечается также значительный вклад в развитие голографии нашего соотечественника Юрия Николаевича Денисюка, выпускника ЛИТМО и сотрудника Государственного оптического института им. С.И. Вавилова. Вклад этот

обычно рассматривается как некоторое усовершенствование первоначальной простейшей однолучевой схемы записи Габора путем замены попутного опорного пучка на встречный.

Соответственно такому подходу ему отводится роль удачливого изобретателя, внесшего весьма полезное изменение в существовавшую уже габоровскую схему записи голограмм. Это усовершенствование позволило получать высококачественные изображения (монохромные и цветные) при освещении голограмм некогерентным белым светом, что значительно расширило область применения таких голограмм в изобразительных целях и принесло заслуженную известность их автору.

Указанный подход к оценке истории голографии и оценке вклада основоположников этого фундаментального раздела оптики в его становление и развитие нашел свое отражение и в международном признании их заслуг спустя 12 лет после присуждения Деннису Габору Нобелевской премии 1971 года «за изобретение и разработку голографического метода» («за создание голографии»). В 1983 году Э. Лейт и Ю.Н. Денисюк были удостоены специально учрежденной награды Д. Габора. Согласно формуле награждения, первый из них получил ее «за метод внеосевой голографии в сочетании с возможностями газовых лазеров», а второй - за «широко известный собственный метод отражательных голограмм». Более последовательно и подробно эта позиция изложена в формуле, приведенной в прилагаемом к награде листе, (ниже дословный авторский перевод этой формулы):

Формула награждения

«Совершенно естественно, что первая награда Денниса Габора, учрежденная SPIE за выдающиеся достижения в оптике, присуждается двум лицам («individuals»), которые более чем кто-либо еще причастны к возрождению интереса к изобретенной Габором голографии, а также к продолжению и дальнейшему развитию этой новой области. Работая одновременно в странах, разделенных тысячами километров, Эммет Лейт и Юрий Денисюк разработали новые и вдохновляющие пути записи голографических изображений.

Лейт и его соавтор Юрис Упатниекс открыли в США метод внеосевой голографии. Этот метод в сочетании с возможностями газовых лазеров открыл путь большинству голографических приложений и многим замечательным трехмерным образам.

Работая в Советском Союзе, Денисюк разработал ныне широко известный собственный метод отражательных голограмм. Голограмма Денисюка стала наиболее употребительной голограммой в мире. Голограммы Денисюка теперь наиболее доступны во всем мире и широко представлены в музеях.

Эти два выдающихся ученых в данной области более всех достойны награды, носящей имя выдающегося лауреата Нобелевской премии Денниса Габора.»

Между тем Ю.Н. Денисюк в своих оригинальных трудах, а также работах, связанных с историей голографии, неоднократно обращал внимание на то, что задачей и результатом его усилий было открытие общего физического явления отображения оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. Разработка же совершенного метода получения трехмерных цветных изображений, создающих полную иллюзию присутствия регистрируемого объекта и названного его именем, была лишь первым вдохновляющим этапом на этом пути.

Целью данной работы является попытка привлечения внимания научной общественности к сравнительно малоизвестным страницам научной биографии Юрия Николаевича Денисюка и вместе с тем известного пересмотра указанных традиций в освещении истории создания голографии и оценке вклада ее создателей. Основанием для этого служат сравнительный анализ фактов и хронологии событий с учетом собственноручных записей Юрия Николаевича Денисюка в его рабочем дневнике, относящихся к 1959 – 1960 годам, а также предельно краткая характеристика последующих работ Юрия Николаевича до 2005 года.

Дневниковые записи Юрия Николаевича Денисюка 1959-1960 годов

Они хранятся в Музее оптики Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики и содержат всего 152 страницы собственноручных записей Юрия Николаевича, сделанных им в рабочем дневнике в период с 17 июля 1959 по 8 октября 1960 года, т.е. в течение неполных 15 месяцев его работы по трехмерной голографии. Из них более 100 страниц относятся к изнурительным экспериментам, связанным с поливами и испытаниями эмульсионных фотослоев, а также оптимизацией условий их химико-фотографической обработки.

Ниже приводятся фрагменты типичных записей, включая ключевые записи о наблюдении главных отличительных черт созданной им трехмерной отражательной голограммы, явившейся на свет 3 декабря 1959 года. Выдержки из оригинальных записей Ю.Н. Денисюка выделены курсивом при сохранении его орфографии, выделения подчеркиванием отдельных фрагментов, а также расположения текста относительно полей рабочего журнала. Сами же ключевые записи, извлеченные из трех страниц факсимильного изображения на рис.1-3, выделены жирным курсивом. Комментарии автора данной статьи набраны обычным текстом. Кроме того, для создания более полного представления о характере работы Ю.Н. Денисюка автор счел уместным поместить

наряду с его портретом 1970 года (рис.4) также фотографии экспериментальной установки и ее оптической схемы, заимствованные из текста его кандидатской диссертации 1963 года (рис.5 и 6) [14]. .

17.07.59 г. – первая запись в рабочей тетради:

Необходимо купать пластинки (часть) и часть центрифугировать.

Беседовал с Протас, необходимо наносить подслои, не высушивая пластинку. Эмульсии необходимо сушить быстро, чтобы не было ... бромистого калия. Существуют мерные пипетки.

Подслои с обратной стороны лучше смыть до нанесения эмульсии. Раствор подслоя хранить в холодильнике. Подслоенные пластинки хранятся неопределенное время.

Положил пластинки в травильную жидкость, они не смачивались. Через 3 часа продрал зубной щеткой – очевидно, задрал поверхностный слой, и они стали смачиваться.

18.07.59 г.

Наносил подслои.

Ванночка для травления была низкой и когда вытащил пластинки, оказалось, что та их часть, которая была ближе к воздуху, опять не смачивается. Продрал щеткой. Составил подслои. Ошибка была в том, что растворилась не вся желатина.

6 пластинок купал и положил на горизонтальный столик – получилось плохо, жидкость собралась в капли.

6 пластинок купал и поставил наклонно.

12 пластинок центрифугировал, на последних 3 обнаружил, что опять не смачивается.

6 первых пластинок ободрал зубной щеткой и снова купал и поставил наклонно. Похоже, что подслои не смачиваются, может быть, его нужно делать толще?

Во всяком случае, купать необходимо.

(Центрифугировал по риске 30 секунд).

Сдал в библиотеку статьи Липпмана, Лемана и Валенты (1894-1912 г.г.)

21.07.59 г.

«Изготовил 5 центрифуг. несенсиб. пластинок Лишнее удалено.

Необходимо улучшить конструкцию фильтра.» Далее приведен рисунок улучшенной конструкции

18.09.59 г.

Сенситометрические клинья в лаборатории фильтров и клиньев Александра Васильевича Смирнова. Г-2-34-80, доб.109, рекомендовала Женя Шепилова.

«Связь ширины спектральной линии с контрастом интерференционной картины»

Далее вывод необходимых соотношений на 7 страницах.

19.09.59 г.

Разговаривал с Левиным, смотрел конструкции микропрофилометров ИС-27, ИС-30.»

25.09.59 г.

Более последовательное рассуждение о форме стоячих волн, возникающих при отражении света от зеркала и о связи этой формы со спектральным составом падающего на зеркало света»

Далее снова вывод необходимых соотношений на 7 страницах.

1.10.59 г.

Форма стоячей волны (точный вывод) - 15 страниц рассуждений и выкладок.

Связь распределения интенсивностей света в стоячей волне с распределением интенсивности в интерференционной картине, локализованной на поверхности фотопластики Еще 10 страниц выкладок.

10.10.59 г.

Рассмотрим вывод Липпмана в моей более современной интерпретации (монохром. свет) Еще 5 страниц теории.

Консультация у Ю.Н. Гороховского относительно сенсibilизации, гиперсенсibilизации фотографических эмульсий и механизмов светочувствительности стекол.

26.11.59 г.

Четвертый полив и обсуждение его результатов

2 декабря 1959 года

«Пятый полив» ...

Следующие записи воспроизведены в оригинальном виде на рис.1-3 и являются ключевыми с точки зрения предмета данной статьи. Они относятся к пластинкам 1 и 2 пятого полива и отмечены Ю.Н. Денисюком отдельной датой – 3 декабря 1959 года. Итак, обратимся к рис.1:

Получилась хорошо первая пластинка, которая купалась в 10% спирте, когда он еще не успел нагреться, далее получились еще 2 пластинки (кажется, я их купал в чистом спирте и при этом не качал ванночку). Эти получившиеся пластинки 3-его декабря были проэкспонированы.

Далее идет описание вида и свойств первой пластинки. И, наконец, решающая запись (начало на рис.2 и окончание на рис.3):

Вторая пластинка 05.02

«Сфотографировано зеркало $R = 2058.6$ мм, лампа СВДШ-250, экспозиция 2 мин., $\lambda = 546$ нм.

Фотография хорошо получилась.

При рассматривании со стороны фотослоя были видны блики от лампы зеленого цвета, соответствующие выпуклому зеркалу.

При рассматривании со стороны стекла виден блик, соответствующий вогнутому зеркалу.

(Вернее 2 блика – блик, соответствующий $r = 2000$ мм, и блик, соотв. $R = 1000$ мм. Откуда этот второй блик, не ясно). Повидимому, как и в пластинке Френеля, - кратные фокуса.

При рассматривании на коллиматоре при освещении $\lambda = 546$ нм слой действует как линза высокого качества.

При дыхании на слой он расширяется и блики краснеют, фокуса их остаются повидимому прежними.»

Воистину: «И взял Он в руку творение свое, и увидел, что оно хорошо».

14 и 19 января 1960 года

«Шестой полив»

Продолжение исследования фотопластинок и составление плана изучения свойств липпмановских эмульсий.

1 февраля 1960 года

«Экспонировал 1 час с лампой СВДШ 1000 – 16-я пластинка. Блик яркий, ярче, чем с СВДШ-250, слой ретикулировал. Слой слишком слабый, может быть, его следует задубить?»

5 февраля 1960 года

Беседа с И.Р. Протас, составление плана необходимых действий по подготовке диссертации к защите.

9 сентября 1960 г.

«Что нужно сделать

- 1. Дописать заявку на открытие*
- 2. Разработать теорию процесса*
- 3. Написать статью о Липпмановских эмульсиях*
- 4. Снять спектральные характеристики*
- 5. Наладить электрическую схему для спектральных характеристик*
- 6. Описать эту схему и монохроматор*
- 7. Снять фотографические характеристики толстослойных эмульсий*

8. Разработать аппарат для фотографирования точек
9. Разработать аппарат для произвольных объектов
10. Достать у Бурмистрова объект»

24 сентября 1960 г.

Детальное рассмотрение вопросов демонстрации отражательных голограмм на выставке. Составление списка ученых, включая И.Е. Тамма, Рытова и Розенберга с их телефонами. Рекомендация А.Г. Власова относительно изучения статей П. Дебая. Перенос установки в комнату Адрианова.

8 октября 1960 г. – последняя запись в рабочей тетради, относящаяся к возобновлению поливов фотопластинок.

Формула открытия Ю.Н. Денисюка №88 с приоритетом от 1 февраля 1962 года

«Установлено ранее неизвестное явление возникновения пространственного неискаженного цветного изображения объекта при отражении излучения от трехмерного элемента прозрачной материальной среды, в которой распределение плотности вещества соответствует распределению интенсивности поля стоячих волн, образующихся вокруг объекта при рассеянии на нем излучения».

Выводы и комментарии. Соображения о роли работ Ю.Н. Денисюка в развитии мировой науки

Таким образом, из представленных выше материалов следует, что тридцатидвухлетний аспирант Ю.Н. Денисюк сделал свое открытие в декабре 1959 года, т.е. определенно ранее появления первых лазеров и работ Лейта и Упатниекса в области оптической голографии. При этом он опирался исключительно на собственные силы и располагал предельно ограниченным набором средств и ресурсов для достижения поставленных им целей. Созданное им оборудование для подслоной подготовки пластинок к поливу эмульсионных слоев, а также проведения экспериментов по записи и изучению свойств трехмерных голограмм было одновременно и «необходимым» и «достаточным». Согласно его личной оценке наиболее важная поддержка была оказана ему сотрудницами лаборатории научной фотографии ГОИ Ивой Рувимовной Протас и Юлией Александровной Кракау, которые в лабораторных условиях синтезировали и поливали на подслоенные фотопластинки различные модификации слоев липпмановских эмульсий с рекордно высокой разрешающей способностью, совершенствуя рецепты полувековой давности [16].

Предложив и обосновав теоретически и экспериментально свой метод трехмерной записи голограмм, или голографии в трехмерных средах, Ю.Н. Денисюк, в отличие от

своего предшественника Д. Габора, показал, что информацию о форме и свойствах освещаемого предмета содержит не только плоская теневая проекция объекта с двумя присущими ей пространственными измерениями, но и все трехмерное пространство, которое окружает объект. При этом благодаря трехмерности регистрирующей среды стала возможной регистрация также и спектрально-временного измерения волнового поля. Таким образом, он установил фундаментальное свойство трехмерной голограммы – способность к записи и воспроизведению четырехмерных пространственно-временных характеристик волновых полей, придав тем самым голографии новый смысл и законченную форму.

Более того, как следует из рабочего журнала, указанное свойство трехмерной голограммы было установлено Ю.Н. Денисюком на основе «современной интерпретации выводов Липпмана» не только до появления лазеров, но и вне связи с развитием идей Габора, что явило собой гораздо более глубокое понимание голографии, как полной записи волновых фронтов.

В первых опубликованных работах Ю.Н. Денисюка [17] это новое для голографии измерение было использовано для воспроизведения цвета источника излучения, записывавшего голограмму. Вскоре голландский ученый Ван Хирден показал, что трехмерная голография позволяет значительно повысить плотность записи информации, а также резко увеличить число независимых волновых полей, одновременно регистрируемых и воспроизводимых одной и той же голограммой [18]. Наконец, в работах [19-21] рядом исследователей было показано, что трехмерная голограмма способна воспроизвести не только спектральное распределение волнового поля, использованного для записи голограммы, но и полную временную развертку оптического сигнала, включая как амплитуду, так и фазу колебаний. Количественная модовая теория трехмерных голограмм была дана В.Г. Сидоровичем [22].

В дальнейшем идеи трехмерной голографии оказали существенное влияние на постановку задач и изучение таких важных направлений современной оптики, как фотонные кристаллы и обращение волновых полей. В частности, точное решение задачи задачи нелинейно-оптического самообращения волновых полей было получено именно на основе модовой теории трехмерных голограмм [23].

Принципиально важная возможность регистрации с помощью голограммы состояния поляризации волновых полей была продемонстрирована и всесторонне изучена Ш.Д. Какичашвили [24]. Статистические характеристики волновых полей, включая пространственно-временную когерентность излучения, изучались в ряде работ Ю.Н. Денисюка с сотрудниками. Было показано, что голограмма наиболее полно отображает

эти свойства и позволяет получать исчерпывающую информацию также и об этой стороне волновых процессов [25].

Таким образом, из приведенных материалов следует, что именно первые пионерские «долазерные» работы Юрия Николаевича Денисюка, а затем и его активное сорокалетнее участие в «лазерном» этапе развития идей записи и восстановления волновых полей и голографических изображений, записи голограмм с помощью частично когерентного и некогерентного излучения, обращения волновых полей в пространстве и времени, а также регистрации бегущих голографических решеток, доплеровских голограмм, портретов функций пространственно-временной когерентности излучения импульсных и непрерывных источников света, динамической голографии, псевдоглубоких голограмм и безопорных селектограмм стимулировали глубокий научный интерес исследователей в нашей стране и за рубежом к голографии прежде всего как всеобъемлющему средству познания свойств, регистрации и преобразования волновых полей, а также как основы широкого круга разнообразных применений.

Невозможно в ограниченной по объему статье охватить весь круг интересов Ю.Н. Денисюка и оценить его действительный вклад в развитие мировой науки, физики, оптики и голографии. Поэтому ограничимся ниже приведением краткого перечня тем, проходивших красной нитью через все творчество Юрия Николаевича, или его «голографических пристрастий», отчетливо сознавая, что всякая попытка подобного рода при оценке деятельности личности такого масштаба изначально является субъективной.

Некоторым аргументом в защиту такого подхода к последующему изложению может служить то обстоятельство, что автор статьи был знаком с Ю.Н. Денисюком, работал под его руководством и постоянно сотрудничал с ним свыше 40 лет – с 1965 по 2006 годы, т.е. в течение всего «лазерного» периода его деятельности.

Далее будет также представлено краткое описание части его работ, относящихся к двум из представленных в этом перечне тем. Одна из частей относится к бегущим волнам интенсивности и была выполнена в ГОИ. Очевидцем и участником этих исследований на начальном и конечном этапах был автор данной статьи. Вторая часть, относящаяся к псевдоглубоким голограммам и селектограммам, связана с физтеховским периодом работы Ю.Н. Денисюка и представлена здесь сотрудницей и соавтором его работ по этой тематике Ниной Мануиловной Ганжерли. Несомненно, что жизнь и научное творчество Юрия Николаевича, а также его вклад в мировую и отечественную науку ждут еще своих настоящих и будущих исследователей и в дальнейшем составят предмет серьезных монографий и многих интересных исследований

«Голографические пристрастия» Ю.Н. Денисюка

- Стоячие волны интенсивности и их отображающие свойства – голография в трехмерных средах и голограммы Денисюка (Ленинская премия, 1970, награда Габора, 1982), теория трехмерных голограмм
- Среда для регистрации голограмм - прежде всего липпмановские слои, бихромированный и гелеобразный желатин, а также любые регистрирующие среды, пригодные для записи трехмерных голограмм
- Новые методы получения трехмерных изображений на основе псевдоглубоких голограмм и селектограмм
- Аспектограммы и трехмерные дисплеи
- Голографические методы улучшения качества изображений – коррекция аббераций объективов и зеркал, влияние свойств регистрирующих сред, видение сквозь рассеивающие и оптически неоднородные среды
- Бегущие волны интенсивности и их отображающие свойства, динамическая голография (Гос. премия, 1982) в кубических и квадратичных нелинейных средах
- Импульсная голография, “Light-in-Flight” и «голографические портреты» когерентности излучения
- Приложения голографии: изобразительная голография, голографические портреты, объемное кино и телевидение, голографические оптические элементы (дифракционные решетки, проекционные экраны, устройства обращения волновых полей в пространстве и времени), голографическая обработка сигналов РЛС (Гос. премия, 1989), акустическая голография, голографическая дисдрометрия, голографические межсвязи в оптических линиях связи и коммутаторах

Голографическая запись бегущих картин интерференции (1966-2005)

Приняв меня в качестве сотрудника в создаваемую им лабораторию голографии ГОИ им. С.И. Вавилова, Ю.Н. Денисюк сразу направил мои усилия на запись голограмм с помощью импульсного рубинового лазера. Это был 1966 год. Окрыленный доверием, новизной работы и убежденностью Юрия Николаевича в необходимости проведения таких исследований, я с энтузиазмом взялся за дело, имея почти трехлетний опыт создания моноимпульсных лазеров на рубине и работы с ними. Было ясно, что придется иметь дело с движущимися объектами и быстропротекающими процессами, однако поначалу я всецело полагался на кратковременность записи, определяемую длительностью импульса, составлявшую в то время 20-30 нс. Этого было вполне достаточно, чтобы полностью исключить влияние на запись голограмм вибраций

установки и перемещения окружающих объектов живой и неживой природы. Размышлять об иных ситуациях мне в то время не приходило в голову.

Однако Юрий Николаевич думал иначе. Он сразу же поставил задачу в самом общем виде – научиться записывать голограммы движущихся объектов не только в «комфортных» условиях, когда за время записи они успевают сместиться не более чем на десятые доли длины волны, но и в случае гораздо более высоких скоростей, приводящих к значительному сдвигу частоты рассеянного излучения. Появление же подобного сдвига неизбежно приводило к стиранию записи интерференционной картины на голографической фотопластинке – единственном в то время доступном и пригодном для записи голограмм носителе информации. Так он увидел крупную проблему голографической записи бегущих картин интерференции, которая потом с некоторыми перерывами занимала его воображение вплоть до самых последних лет жизни.

Можно выделить три периода научной работы Юрия Николаевича, тесно связанных с расширением возможностей регистрирующих сред для записи таких картин.

1966-1968 г.г. – когда решались проблемы стабилизации положения записываемых интерференционных картин с помощью предложенных Ю.Н. Денисюком оригинальных научно-технических решений. Одно из них основывалось на модуляции пропускания оптического затвора, расположенного перед голограммой, в такт с бегом интерференционной картины [26], а второе – на повороте волны, освещающей поток с движущимися частицами со скоростью вращения, согласованной с их движением [27].

1974-1978 г.г. – когда внимание Ю.Н. Денисюка привлекли возможности использования для записи движущихся объектов нового класса регистрирующих сред – нелинейно-оптических, которые позволили осуществить одновременную динамическую запись и считывание информации об объекте без стабилизации бегущих картин интерференции. Юрий Николаевич рассмотрел самые общие отображающие свойства нового класса голограмм – динамических голограмм с записью в кубических нелинейных средах. Это рассмотрение привело его к предсказанию удивительного свойства динамических голограмм движущегося объекта – автоматической фокусировки на него обращенного излучения с упреждением в пространстве, определяемым его текущей скоростью [28,29]. За цикл работ по динамической голографии Ю.Н. Денисюк в 1982 году был удостоен Государственной премии СССР в составе коллектива авторов.

1998-2005 г.г. – работая в Италии и по возвращении на родину Ю.Н. Денисюк еще раз вернулся к теме голографической записи бегущих картин интерференции. На этот раз он обратился к использованию для записи голограмм квадратичных нелинейных сред с предельно высоким быстродействием – вплоть до долей фемтосекунд, что позволяет с

помощью методов динамической голографии преобразовывать и создавать новые пучки света, отличающиеся по частоте на десятки и сотни процентов.

Он детально изучил трансформационные свойства таких голограмм, определяющие положение, масштаб и цвет получаемых изображений как при генерации изображений на второй гармонике записывающего голограмму излучения, так и в случае, когда длины волн отличаются друг от друга и генерация изображений происходит на суммарных частотах [30,31].

Такие голограммы способны найти самое широкое применение для решения задач современной оптической информатики в линиях волоконной оптической связи, сверхбыстрой коммутации информационных световых потоков, высокоскоростной обработки информации, оперативного управления системами ввода-вывода информации для устройств оптической памяти .

Таким образом, на протяжении четырех десятков лет я имел возможность неизменно убеждаться в необычайной физической интуиции Юрия Николаевича и его удивительном умении ставить крупные задачи и достигать поставленные цели ценой минимальных средств и усилий.

Псевдоглубокие голограммы и селектограммы (1989-2005)

В период работы Ю.Н.Денисюка в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (1989-2005 годы) им был высказан и реализован ряд идей по развитию методов получения и проекции трехмерных изображений. Так в конце 80-х годов, заинтересовавшись идеей оптических компьютеров, Юрий Николаевич Денисюк провел сравнение различных типов голограмм: двумерных, трехмерных и волноводных.

Рассматривая возможности применения голографии в системах оптической обработки информации, Юрий Николаевич обратил внимание на то, что записываемая на голограмме информация во многих случаях может быть представлена в виде одномерных строчек, а не в традиционном формате двумерных страниц. Опираясь на это обстоятельство, он предложил метод так называемых псевдоглубоких голограмм [32,33].

Кардинально изменив геометрию записи двумерной голограммы благодаря выбору скользящего падения на нее объектного и опорного пучков, он по сути преобразовал одну из поперечных координат голограммы в продольную координату, тем самым резко увеличив эффективную глубину записи.

Такая голограмма, обладая высокой угловой и спектральной селективностью, характерной для глубоких трехмерных голограмм, вместе с тем не требует использования специального объемного светочувствительного материала и может быть записана на

обыкновенных фотопластинках толщиной в несколько микрон. Псевдоглубокие голограммы органично сочетают в себе свойства двумерной, трехмерной и волноводной голограмм и позволяют реализовать ряд операций, которые ранее можно было выполнить только с помощью трехмерных и волноводных голограмм. Это открывает возможность их использования в оперативной памяти оптического компьютера и устройствах межсвязей его элементов. Кроме того, существенное сокращение требований к параметрам фотоматериала позволяет синтезировать псевдоглубокие голограммы с помощью компьютера и реализовать их методами цифровой голографии.

Стремясь к возможному упрощению требований, предъявляемых к источникам записывающего и восстанавливающего голограмму излучения, Ю.Н. Денисюк в начале 90-х годов развил метод псевдоглубоких голограмм применительно к задаче регистрации трехмерных изображений. С этой целью он предложил метод так называемых селектограмм, основанный на селективном свойстве трехмерной решетки в силу условий Брэгга выбирать из протяженного светового фона и направлять далее один определенный луч света. Вывод метода и его экспериментальная проверка изложены в работах [34].

Далее Ю.Н. Денисюком был предложен метод получения трехмерных изображений методом безопорных селектограмм, согласно которому референтная волна формируется из объектной с помощью дифракционной решетки, расположенной непосредственно перед объемным светочувствительным слоем [35]. Несмотря на то, что этот метод безопорных селектограмм не является столь универсальным, как голография и воспроизводит эффекты объемного восприятия только в горизонтальной плоскости, он имеет ряд преимуществ, основным из которых является существенное снижение требований к когерентности излучения, используемого при записи.

В конце 90-х с целью развития систем проекции трехмерных изображений и создания трехмерных дисплеев, способных воспроизводить в реальном времени изображения естественных движущихся объектов, Ю.Н. Денисюком с соавторами был предложен и реализован на практике метод проекции трехмерных изображений с помощью сфокусированных в малые области аспектов трехмерной сцены [36].

В основе технических преимуществ данного метода лежит отказ от воспроизведения соотношений фаз в удаленных друг от друга точках волнового поля света. Благодаря этому становится возможной последовательная передача элементов трехмерного изображения по линиям связи, а также существенное сокращение объема информации, которую необходимо запомнить и представить одновременно на пространственном управляемом транспаранте.

Этот метод, будучи хорошо сопрягаем с существующей телевизионной техникой, способен воспроизводить горизонтальный и вертикальный параллаксы, эффект «оглядывания» предметов, а также изменения конфигурации.

Заключение

Таким образом, из сказанного выше следует, что полвека назад, а затем и в течение всей своей жизни Юрий Николаевич Денисюк по существу явился создателем научных основ оптической голографии как самостоятельного научного направления в оптике, целью которого являлось всестороннее изучение свойств трехмерных волновых полей и их преобразования в пространстве и времени.

В своем научном творчестве он удивительно органично соединил две эпохи развития оптики – «долазерную», в рамках которой он успел сделать свое выдающееся открытие, - с «лазерной» и «нелинейно-оптической» эпохой, где он поставил и решил ряд новых принципиальных проблем голографии, что принесло ему мировое признание и заслуженную славу.

Действительно, введя своим открытием третье измерение в регистрирующую среду, он одновременно фактически ввел в голографию также и четвертое измерение – спектрально-временное, по существу завершив формирование ее «жизненного пространства». Тем самым он очертил и новые современные границы величественного здания волновой физической оптики, встав в один ряд с ее творцами, начиная от Гука, Гримальди, Гюйгенса, Ньютона, Юнга, Малюса, Френеля, Максвелла и кончая Липпманом, Зоммерфельдом и Габором.

Следует отметить, что круг интересов его великих предшественников был ограничен главным образом проблемами изучения дифракционных картин теней, возникающих за освещенными предметами. Благодаря введению в теорию и практику голографии новых физических измерений, Юрий Николаевич, образно выражаясь, превратил «театр теней», коим она была до того, в театр «света и цвета», которым она стала благодаря его усилиям.

Одновременно с этим он по существу наполнил новым содержанием само имя «голография», данное ей при рождении Деннисом Габором скорее «на вырост», окончательно придав ему смысл полной записи информации о волновом поле излучения, рассеянного любым физическим объектом.

Он был выдающимся физиком-новатором и крупнейшим оптиком двадцатого века, внесшим фундаментальный вклад в развитие волновых представлений оптики, познание Природы и прогресс мировой науки.

Своими работами Ю.Н. Денисюк подвел итог 300-летнему развитию волновой физической оптики (1665-1964 г.г.) и одновременно открыл для нее новые горизонты и возможности, чем навсегда прославил отечественную науку. Мы вправе гордиться тем, что были его современниками, помогали ему и принимали участие в развитии его идей. Наш долг сохранить и увековечить память о нем и его делах для будущих поколений нашей страны.

Автор глубоко благодарен Т.С. Юдовиной и И.Н. Ивановой за предоставленную возможность изучения рабочих дневников Ю.Н. Денисюка, Н.М. Ганжерли за предоставление фрагмента статьи о его работе в ФТИ над псевдоглубокими голограммами и селектограммами, а также А.В. Крайскому за организационную поддержку и ценные замечания. Искренне признателен Е.Б. Александрову, А.Ф. Белозерову, В.М. Кожевникову, А.Н. Малову, Э.В. Милоглядову, Г.В. Папаяну, А.К. Ребане и В.Г. Сидоровичу за стимулирующие обсуждения темы и содержания статьи, а также важные замечания по ее тексту.

Литература

1. Einstein A. *Phys.Z.*, **18**, 121, (1917).
2. Maiman T.H. *Nature*, **187**, (4736), 493, (1960).
3. Хазов Л.Д., *Опт.-мех. пром-сть* №1, 32, (1961).
4. Хазов Л.Д., «*Оптические квантовые генераторы на рубине*» автореферат докторской диссертации, (Ленинград, 1972, 32 с.); Степанов Б.И., Самсон А.М., Хазов Л.Д. *ДАН СССР* **148**, 317 (1963); Белоусова И.М. *УФН*, **181**, 79, (2011).
5. Wawilov S.I., Lewschin W.L. *Z. Physik.* №35, 932, (1926); Вавилов С.И. «*Микроструктура света*» (Москва, 1950, с.198).
6. Franken P., Hill A., Peters C, Weinreich G. *Phys. Rev. Lett.* **7**, (3), 118. (1961).
7. Ахманов С.А., Хохлов Р.В. *ЖЭТФ*, **43**, (7), 351. (1962), Ахманов С.А., Хохлов Р.В. «*Нелинейная оптика*», (Москва, 1964, 296 с.).
8. Летохов В.С. «*Нелинейные селективные фотопроцессы в атомах и молекулах*» (Москва, 1983, с.408); Летохов В.С., Чеботаев В.П. «*Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения*» (Москва, 1990, с.496); Шен И.Р. «*Принципы нелинейной оптики*» (Москва, 1989, 538с.).
9. Шушурин С.Ф. *УФН* **105**, 145, (1971); Johnston S.F. *History and Technology* **20**, 29, (2004), Денисюк Ю.Н. «*Принципы голографии*» (Ленинград, 1979, 124с.).
10. Denisyuk Yu.N., “My Way in Holography”, *Leonardo*, **25**, N5, 425, (1992).
11. *Proceedings of SPIE* V.4737, (2003); Сборник трудов Всероссийского семинара

- «Юрий Николаевич Денисюк – основоположник отечественной голографии», Санкт-Петербург, 2007, 300с.).
12. Gabor D. *Nature* **161**, 777, (1948).
 13. Gabor D. *Proc. Roy. Soc. (London)* **A197**, 454, (1949). Gabor D. *Proc. Phys. Soc.* **B64**, 449, (1951).
 14. Leith E.N., Upatnieks J. *JOSA* **52**, 1154, (1962).
 15. Leith E.N., Upatnieks J. *JOSA* **53**, 1377, (1963); Leith E.N., Upatnieks J. *JOSA* **54**, 1295, (1964).
 16. Денисюк Ю.Н., Протас И.Р. *Опт. и спектр.* **14**, 721, (1964).
 17. Денисюк Ю.Н. *ДАН СССР* **144**, 1275, (1962); Денисюк Ю.Н. *Опт. и спектр.* **15**, 523, (1963); Денисюк Ю.Н. «Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения» диссертация на соискание степени кандидата физ.-мат. наук (Ленинград, 1963, 133 с.).
 18. Van Heerden P.I. *Appl. Opt.* **2**, 393. (1963).
 19. Зубов В.А., Крайский А.В., Кузнецова Т.И. *Письма в ЖЭТФ* **13**, 443 (1971); Штырков Е.И., Самарцев В.В. *Опт. и спектр.* **40**, 392, (1976); Штырков Е.И., *Опт. и спектр.* **45**, 603, (1978).
 20. Ребане А.К., Каарли Р.К., Саари П.М. *Письма в ЖЭТФ* **38**, 383, (1983). Saari P., Kaarli R., Rebane A. *J. Opt. Soc. Amer.* **B3**, 527, (1986).
 21. Мазуренко Ю.Т. *Опт. и спектр.* **56**, 583-584 (1984); Мазуренко Ю.Т., Путилин С.Э., Кузнецов В.В., Лавренов Л.М. *Опт. и спектр.* **71**, 385, (1991); Mazurenko Yu.T., Udaltsov V.S., Veniaminov A.V., Doppel E., Kuemstedt P. *Opt. Commun.* **96**, 202, (1993).
 22. Сидорович В.Г. *ЖТФ* **46**, 1306, (1976).
 23. Сидорович В.Г. *ЖТФ* **46**, 2168, (1976).
 24. Какичашвили Ш.Д. *Опт. и спектр.* **42**, 390, (1977).
 25. Стаселько Д.И., Денисюк Ю.Н., Смирнов А.Г. *Опт. и спектр.* **26**, 911, (1969); Стаселько Д.И., Денисюк Ю.Н. *Опт. и спектр.* **28**, 324, (1970).
 26. Денисюк Ю.Н., Стаселько Д.И. *ДАН СССР* 1967, **176**, 1274, (1967).
 27. Денисюк Ю.Н., Стаселько Д.И., Минина В.П. *Опт.-мех. пром-сть* №11, 73, (1968).
 28. Денисюк Ю.Н. *ЖТФ* **44**, 131, (1974).
 29. Денисюк Ю.Н. *Письма в ЖТФ* **7**, 641, (1981).
 30. Denisyuk Y.N, Andreoni A., Bondani M., Potenza M.A.C. *Optics Letters*, **25**, 890, (2000).
 31. Стаселько Д.И., Денисюк Ю.Н., Сизов В.Н. *Опт. и спектр.* **93**, 500, (2002),

- Стаселько Д.И., Милоглядов Э.В., Денисюк Ю.Н. *Опт. и спектр.* **98**, 152 (2005).
32. Денисюк Ю.Н. *Письма в ЖТФ* **15**, 84, (1989); Денисюк Ю.Н. *ЖТФ* **60**, 59, (1989).
33. Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli *Opt. Eng.*. V. **31**, 738, (1992).
34. Денисюк Ю.Н. *Письма в ЖТФ* **18**, 15, (1992); Denisyuk Yu.N., Ganzherli N.M. *Opt. Eng.* **32**, 958, (1993).
35. Денисюк Ю.Н. *Письма в ЖТФ* **21**, 51, (1995); Денисюк Ю.Н. *Опт. и спектр.* **79**, 858, (1995); Ганжерли Н.М., Денисюк Ю.Н. *Опт. и спектр.* **79**, 670, (1995); Denisyuk Yu.N., Savostyanenko N.A. *Opt. Eng.* **35**, 554, (1996).
36. Denisyuk Y. N., Markov V.B., Ganzherli N.M. *Proceedings SPIE* **3011**, 45, (1997); Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М., Орлов В.В., Бруй Е.Б., Савостьяненко Н.А. *Опт. и спектр.* **86**, 864, (1999).

Создане волни волни дим дим
перидива и испитива стет, но
повидимому дим буде неоднороден
т.к. безкислотен оловне смислен,
одрже волни могу сеобод. рачне
лупе диме диме волни

5^{ти} колуб. 2^{го} деадр.

Било одлажене во реткувачу
в основном повидимому карбону
неи во ретори в карби проакоаде
одрабоба смитом ретне
коди било введено оловне
дисилур. коди, в асодра проакоаде
проакоаде, то реткувачу ретне
уменишало, одика оловне
ретино, повидимому ретне во
спир не одлажене.

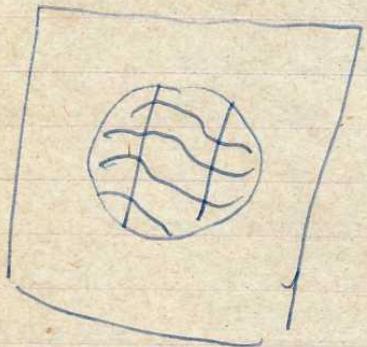
Получило верне Т^а и асодра
коди купило в 10% шире
коди он еде не удеи карбон
оде, диме получило в
еде 2 листики (кашез в и
купи в асодра шире и при
дом не купи в асодра.)

Дом получивше листики
3^{го} деадр дим проакоаде
1^а пластика.

Вместо одлажене било посублено
зерало, димозуци дим
1 ми 5 ми, 30 ми.

Секциямигровый пикап

Результат для следующего
направления проходимости в
ручье фактате. Рекомендуется
взвешивать, при этом примерное
расстояние А и величина расстояния В.
В результате при измерении со
стороны след было видно
множество новых железных ульев



во всех 3-х местах
числа и диаметры
в районе фактата
30 мм диаметра
на высоте 10 мм от
5 мм и 1 мм сверху -
ферне.

Возраст пикапа 05.02

Сторожафарована ^{земля} ~~матри~~ $R=2058,6$
лампа ВДМ-280 $\lambda=546 \text{ нм}$

Вотрапуз ^{экспонирован} ~~верно~~ ^{2 мм} ~~погружен~~

При рассматривании со
стороны железной дна видны
блуждающие лампы железного
улья соответствующим образом
выраженному зеркала.

При рассматривании со стороны
соседи видны железные лампы
соответствующим образом зеркала.

(вернее 2 лампы - одна соответствующая
 $r=2000 \text{ мкм}$ и одна соотв. $R=1000$
откуда 200 вольт лампы медно)
повидимому и в плоскости
ферне краткие фокусы.

При рассматривании на коллинеиде
всплывающим $\lambda = 546 \text{ мкм}$
сильно выделяется ион
высокого качества.

При окрашивании на слайде с красителем
и бланк краснеет, крася
их остаток наблюдаемому эффекту.

14 декабря 1960г.

Написан слайд 6^й номер
Камес 12 см. Сухое время 10 мин при 38° 1
расположении в первом ^{устройство} ^{последнее 2} ^{формы}
первый 3 отрез ионные ¹ ^{формы}

Кислоты окислительная реакция во
всех при нагреве температуре $5-6^\circ$
сильно покрывает поверхность
при температуре $15-16^\circ$.

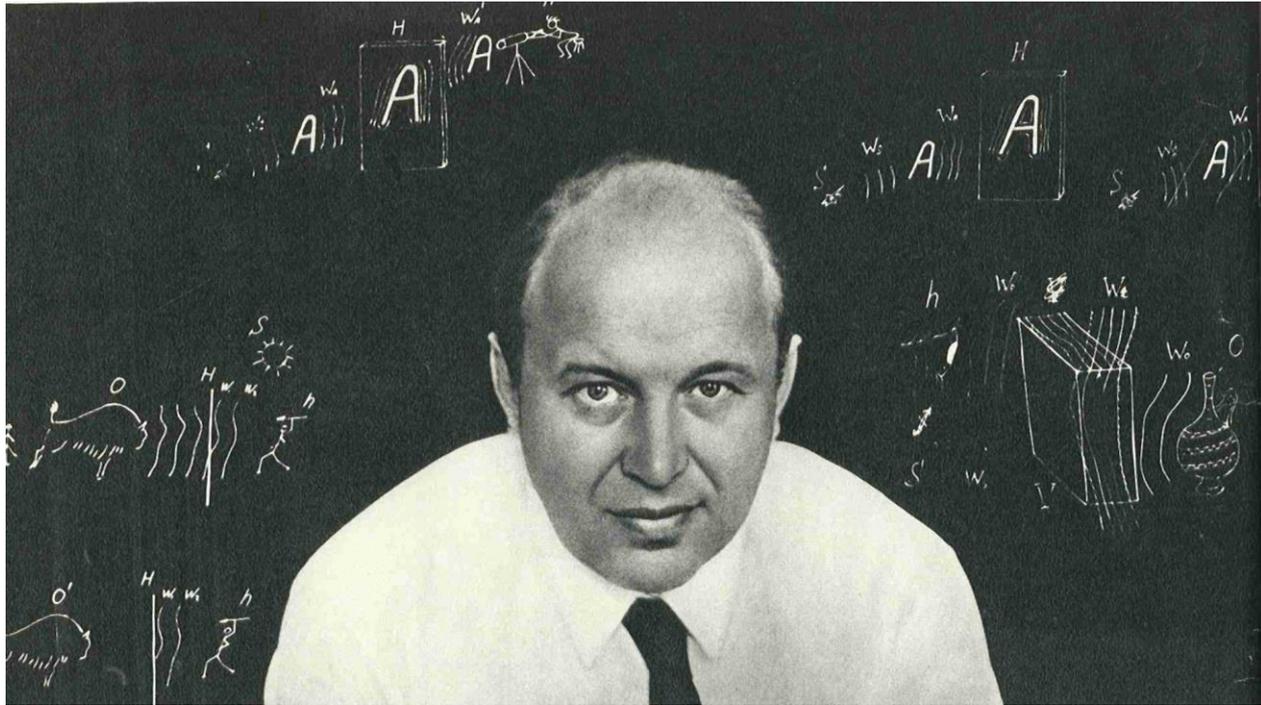
кажущаяся реакция
лучше всего - от посредные $-10-12^\circ$
Камес также высушить во
вакууме и лучше краситель

Курса планов в сторону расгон
дальше вперед лучше всего 2-3 мин
наблюдать отже свойства реакции.

15 декабря

Камес 6 пластина сгруппированные
слайд 2 мин (время сублимации) 3
Время окрашивания при температуре $10-15^\circ$
высота реакции слайда форма
и небом помет?

Далее 3 слайда пластины
сублимация 6 мин (суб. 15 мин) [4 сублим. 2 мин]



Подписи к рисункам статьи Д.И. Стаселько «*Юрий Николаевич Денисюк и трехмерная оптическая голография. К пятидесятилетию открытия физического явления*».

Рис.1-3 Три страницы из исторического рабочего дневника Юрия Николаевича Денисюка 1959-1960 годов, в которых зафиксированы его наблюдения и впечатления от первых созданных им отражательных голограмм.

Рис.4 Юрий Николаевич Денисюк, 1970 год.

Рис.5 Оптическая схема установки Ю.Н. Денисюка

Рис.6 Фотография установки Ю.Н. Денисюка для получения и исследования волновых фотографий, 1959 год.

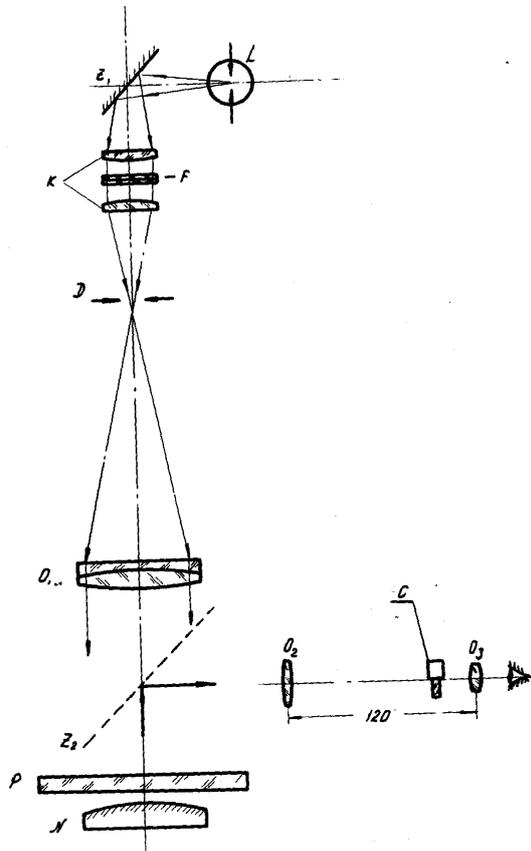


Рис. 14. Оптическая схема прибора для получения и исследования волновых фотографий.

L ; Z_1 ; K ; F ; D ; O_1 - детали коллиматора.

Z_2 - съемное полупрозрачное зеркало,

P ; N - фотопластика и объект, укрепленные на столике,

O_2 ; O_3 - микроскоп,

C - визуальный фотометр.

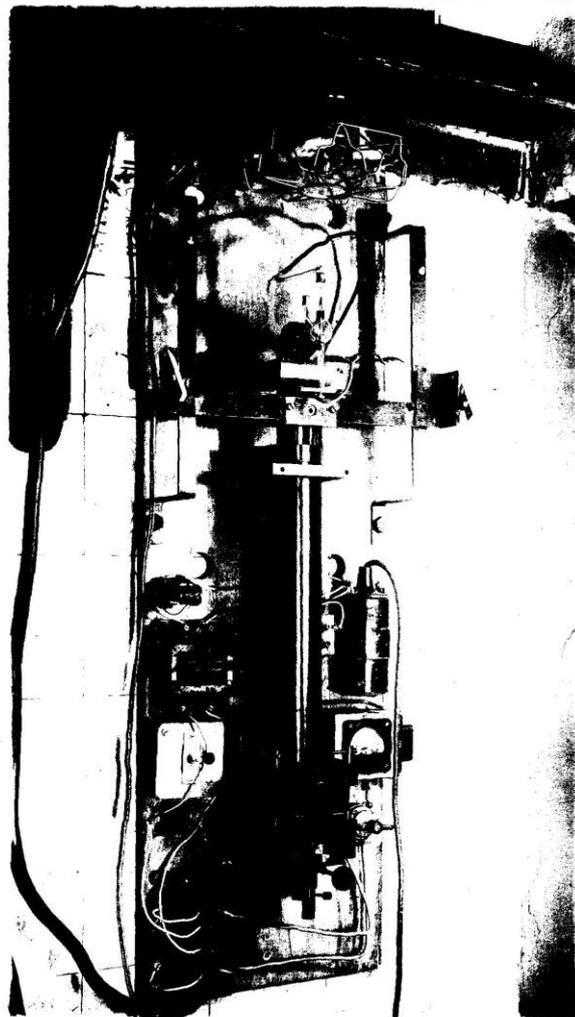


Рис. 15. Установка для получения и исследования волновых фотографий. Сверху виден вентилятор для воздушного охлаждения лампы (в данном случае установлена лампа ДРП-250). По бокам коллиматора установлена электрическая арматура для поджига лампы. В нижней части коллиматора с помощью винтов с барашками укреплены столик и полупрозрачное зеркало. При фотографировании полупрозрачное зеркало снималось и столик привинчивался непосредственно к коллиматору.