

Идеи Ю.Н. Денисюка в развитии голографических методов получения и проекции изображений

© Н.М. Ганжерли

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: nina.holo@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 3 апреля 2017 г.)

Изложены основные положения исследований, выполненных Юрием Николаевичем Денисюком в стенах ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Исследования были направлены на развитие методов получения и проекции трехмерных изображений, целью которых было уменьшение объема заключенной в изображения информации для использования в оптических компьютерах, оптических межсвязях и дисплеях.

DOI: 10.21883/JTF.2017.10.44985.2276

Введение

27 июля 2017 г. исполнилось 90 лет со дня рождения выдающегося ученого-оптика, создателя отражательной голографии, академика РАН Юрия Николаевича Денисюка, впервые в 1962 г. продемонстрировавшего в статье



Рис. 1. Юрий Николаевич Денисюк в рабочем кабинете ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Ноябрь 2005 г.

„Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения“ [1] возможность записи голограмм (волновых фотографий) в трехмерных средах (рис. 1). Это сыграло затем огромную роль в различных применениях голографии в науке и практике. В своей нобелевской лекции изобретатель голографии Д. Габор¹ особо отметил это открытие Ю.Н. Денисюка. В 1970 г. за цикл работ „Голография с записью в трехмерных средах“ Юрию Николаевичу была присуждена Ленинская премия. А в 1983 г. Ю.Н. Денисюк и Э. Лейт были удостоены специально учрежденной SPIE награды им. Д. Габора. В формуле, приведенной в прилагаемом к награде листе, написано:

„Работая одновременно в странах, разделенных тысячами километров, Эммет Лейт и Юрий Денисюк разработали новые и вдохновляющие пути записи голографических изображений...“

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.“

После окончания Ленинградского института точной механики и оптики с 1954 г. Ю.Н. Денисюк работал в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова, с 1971 г. заведовал лабораторией, затем отделом, занимавшимся голографической тематикой. В ГОИ Юрий Николаевич сумел увлечь своими идеями большую группу талантливых ученых, которые развивали различные направления голографии, и там были созданы первые объемные голограммы с восстановлением трехмерных изображений в белом свете.

¹ Д. Габор. Успехи физических наук // 1973. Т. 109. Вып. 1. С. 5–30.

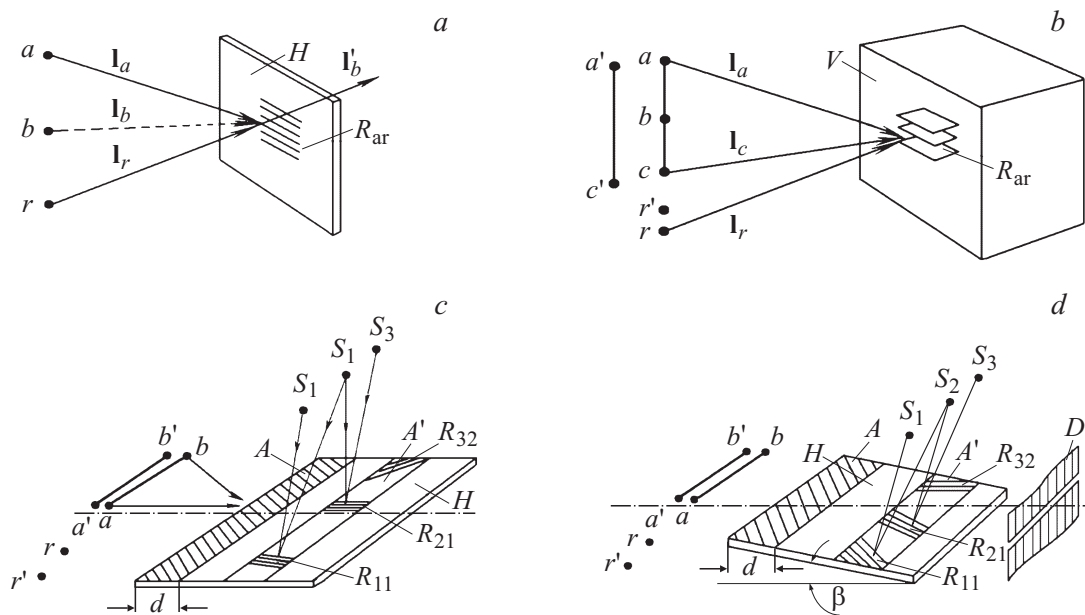


Рис. 2. К рассмотрению особенностей межсвязей, устанавливаемых с помощью двумерной (а), трехмерной (b), волноводной (с) и псевдоглубокой (d) голограмми: H, V — голограмма; D — экран со щелью; $R_{ar}, R_{11}, R_{21}, R_{32}$ — решетки; A, A' — полоски голограмм; S_1, S_2, S_3 — вспомогательные источники света; $ab, abc, a'b', a'c'$ — строчечные объекты; a, b, c, a', b', c' — точки объекта; r, r' — точки референтного источника; l_a, l_b, l_r — падающие на голограмму лучи; d — глубина записи; β — малый угол между псевдоглубокой голограммой и плоскостью распространения лучей.

В 1988 г. Юрий Николаевич возглавил Лабораторию оптоэлектроники и голографии Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН и продолжил исследования в области голографии. Цель настоящей работы постараться передать, как развивались не потерявшие актуальности идеи Денисюка применительно к методам получения и проекции трехмерных изображений, направленные на снижение заключенных в трехмерных изображениях объемов информации, с целью использования голографии в оптических компьютерах, оптических межсвязях, в оптических дисплеях и т.д.

Получение трехмерных изображений методом псевдоглубоких голограмм

В конце 80-х годов, заинтересовавшись идеей оптических компьютеров, Юрий Николаевич Денисюк провел сравнение различных типов голограмм: двумерных, трехмерных и волноводных на предмет удобства обращения к голограмме и однозначности установления оптических межсвязей (рис. 2, а–с). Голография предлагает способ передачи сигналов посредством распространяющихся в пространстве наложенных друг на друга волн, связь между которыми осуществляется с помощью многократно наложенных друг на друга решеток. Такие связи наиболее естественно выглядят в пространстве Фурье, где волнам соответствуют точки, а решеткам — соединяющие их векторы.

Однозначный характер связей возможно осуществить с помощью трехмерных [1–4] и волноводных голограмм [5,6]. Трехмерная голограмма в отличие от двумерной устанавливает однозначную систему связей между записанными на ней волнами. Каждая из зарегистрированных на голограмме решеток в силу условий Брэгга взаимодействует только с той парой волн, которые ее образовали. Это позволяет использовать трехмерную голограмму для создания системы ассоциативной памяти, а также уплотнения записи информации посредством многократного впечатывания голограмм в один и тот же объем светочувствительного материала [3,7,8]. К недостаткам трехмерной голограммы следует отнести то, что составляющими ее трехмерными решетками достаточно сложно управлять по отдельности — стирать, перезаписывать информацию и т.д.

Рассматривая возможность применения голографии в системах оптической обработки информации, Ю.Н. Денисюк обратил внимание на то, что записываемая на голограмме информация в ряде случаев может быть представлена в виде одномерных строк. Учитывая это, он предложил метод так называемых псевдоглубоких голограмм [9,10], схема записи которых приведена на рис. 2, d. Светочувствительный слой H , на котором записывается веер распространяющихся от строчечного объекта ab лучей, расположен под малым углом по отношению к плоскости, в которой распространяются эти лучи. За голограммой установлена щель D , которая при реконструкции голограммы пропускает только лежащие в плоскости объекта ab лучи и отсекает все остальные.

Физическая толщина светочувствительного слоя псевдоглубокой голограммы со специально выбранной щелью дает в результате свойства, близкие к свойствам волноводной и трехмерной голограмм. В работе [10] было показано, что, если угловую ширину щели, которая отсекает все выходящие из горизонтальной плоскости лучи, выбрать равной углу дифракционной расходимости пучка лучей, пересекающих, например, полоску A псевдоглубокой голограммы, то селективные свойства этой голограммы будут такими же, как у трехмерной голограммы, глубина которой равна глубине полоски d . Выражения, описывающие спектральную и угловую селективности псевдоглубокой голограммы, совпадают с выражениями, полученными для трехмерной голограммы в случае использования так называемого борновского приближения, которое действительно при малых значениях дифракционной эффективности [10]. Селективными свойствами псевдоглубоких голограмм можно управлять в весьма широких пределах за счет изменения глубины записи d , ширины щели D , а также других параметров оптической схемы (рис. 2, d).

Наличие селективных свойств у псевдоглубокой голограммы открывает возможность осуществления ряда операций, которые ранее можно было выполнить только с помощью трехмерных и волноводных голограмм [11–14]. Экспериментально были осуществлены такие характерные для трехмерных голограмм операции, как ассоциативная реконструкция всего объекта излучением части записанного на голограмме объекта [15,16]; многократная запись голограмм на один и тот же участок светочувствительного материала [17]; распознавание записанной информации посредством реконструкции объектной волной [18,19]; использование протяженных световых моделей ортогональных функций в качестве референтных источников [20]; реконструкция псевдоглубокой голограммы излучением с длиной волны, отличающейся от используемой при записи [21].

Оценивая перспективы применения данного метода в оперативной памяти оптического компьютера и устройствах межсвязей его элементов, следует иметь в виду, что метод основан на использовании тонкослойных светочувствительных сред, что серьезно упрощает требования к светочувствительному материалу. Существенным преимуществом псевдоглубокой голограммы является также и то, что третье измерение пространства может использоваться для контроля ее структуры. Голограмма может быть синтезирована с помощью компьютера, что практически невозможно в случае, когда голограмма действительно трехмерна. Платой за эти преимущества становится необходимость отказа от регистрации двумерных страниц информации и перехода к страницам, имеющим вид строки. Однако линейные страницы информации широко и успешно применяются в оптических устройствах, предназначенных для обработки радиосигналов. Такие страницы, в частности, удобны тем, что их можно вводить с помощью акустооптических линий задержки.

Получение трехмерных изображений методами селектограмм и безопрных селектограмм

Одним из основных приложений голограмм является запись и реконструкция изображений, воспроизводящих иллюзию объемности регистрируемых объектов, воспринимаемых зрителем при непосредственном наблюдении совершенно идентичными исходным объектам [1,22,23]. К сожалению, с появлением голографии проблема создания техники трехмерного кино и телевидения не решилась. Голографический принцип создания изображений приводит к возникновению большого объема избыточной информации, регистрируемой и воспроизводимой голограммой. К тому же необходимо записывать голограмму, используя источники высоко когерентного света.

Развитие изобразительной голографии показало, что наиболее удобными для практики являются те разновидности голограмм, которые предъявляют минимальные требования к источнику света, осуществляющему их реконструкцию. Так, в настоящее время наиболее широко используются радужные [23] и отражательные [1,3] голограммы, которые допускают реконструкцию точечным источником обычного белого света. Возникает естественный вопрос, можно ли попытаться еще более снизить требования, предъявляемые к источнику света, т.е. разработать такие типы голограмм, которые, подобно обычным фотографиям, допускали бы запись и реконструкцию с помощью протяженных источников света?

В силу особенностей строения визуального аппарата человека воспроизведение эффектов объемности объекта, и, следовательно, и воспроизведение направлений распространяющихся от него лучей может быть ограничено одной горизонтальной плоскостью. Этот подход был успешно использован С.А. Бентоном при создании известного метода радужных голограмм [23].

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, предложив метод так называемых селектограмм, использующий селективные свойства решеток. Схема записи и реконструкции селектограммы приведена на рис. 3. Вывод метода и его экспериментальная проверка изложены в работах [24–26].

Регистрация селектограммы произвольного диффузного объекта была сложной в силу недостатка света после фильтрации щелью. Решением проблемы стала регистрация изображений, которые предварительно сфокусированы в область фотопластинки, на которой записывается селектограмма [27–31]. Требования к угловой разрешающей способности системы в этом случае существенно уменьшаются. Предварительная фокусировка объекта на

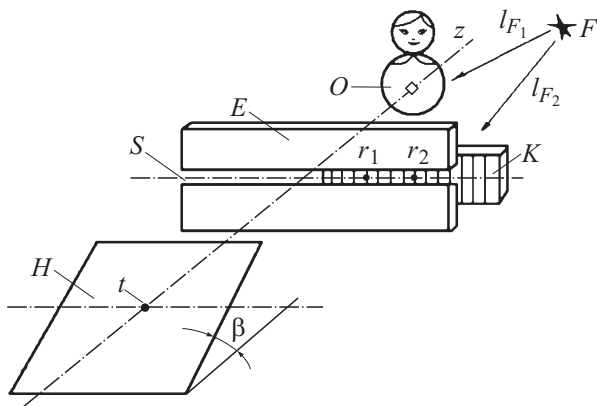


Рис. 3. Схема записи и реконструкции селектограммы: H — селектограмма; F — источник монохроматического излучения; O — объект; S — щель в экране E ; K — диффузор; l_{F1} , l_{F2} — освещающие объект и диффузор лучи; β — малый угол наклона селектограммы к оптической оси z .

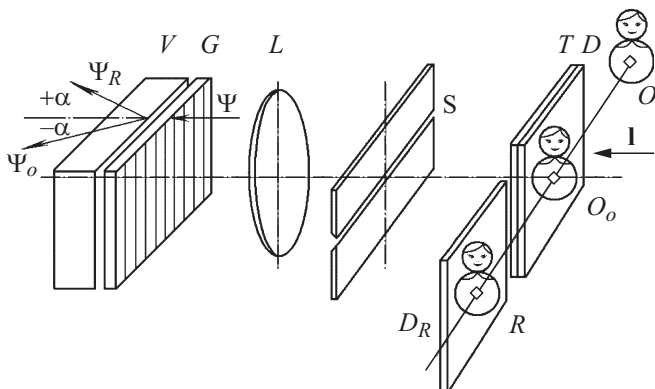


Рис. 4. Схема записи и реконструкции безопорной селектограммы: l — лучи когерентного источника, освещающие через диффузор D объект-транспарант T с объектом O_o ; S — фильтрующая щель в экране; V — толстослойная регистрирующая среда; L — коллимирующая линза; Ψ_o и Ψ_R — образованные решеткой G объектная и референтная волны, формирующие мнимые изображения объекта O и R .

селектограмму позволяет также уменьшить количество возникающих при реконструкции дополнительных изображений и тем самым увеличить дифракционную эффективность основного восстановленного изображения.

Поскольку селектограмма может быть зарегистрирована с использованием протяженного референтного источника света, такой источник может быть сформирован из света, рассеянного самим объектом. Подобная ситуация обсуждалась еще в 60-х годах XX века в работах [32,33], и такие голограммы получили название „голограмм с локальным референтным лучом“. В этом случае референтное излучение автоматически когерентно по отношению к излучению, рассеянному объектом, поэтому требования к когерентности регистрирующего излучения значительно снижаются.

Использование оптического элемента, который расщеплял бы рассеянное объектом излучение на объектную и референтную составляющие, стало следующим шагом в развитии метода селектограмм [34,35]. В этих работах был предложен метод так называемых безопорных селектограмм, в котором референтная волна формируется из объектной с помощью дифракционной решетки, расположенной непосредственно перед объемным светочувствительным слоем (рис. 4), а также проведен анализ процесса формирования изображения в этом случае.

На этапе реконструкции селектограмма допускает восстановление изображения протяженными, некогерентными источниками света, что также представляет интерес для изобразительной техники, поскольку лазерный свет вреден для зрения, а формируемые им изображения искажены спекл-шумом. Обсуждая такие возможные приложения, как трехмерные дисплеи компьютеров, трехмерное телевидение и кинематограф, следует отметить, что реконструированное селектограммой изображение не содержит информации о значении фаз на поверхности объекта. Это свойство селектограммы позволяет сужать полосу частот сигналов, которые передают трехмерное изображение по каналам связи. К полезным свойствам рассматриваемой схемы безопорной селектограммы следует отнести ее малую чувствительность к вибрациям установки. Главным требованием остается отсутствие горизонтальных смещений решетки относительно светочувствительного слоя.

Возможность записи безопорных селектограмм по рассмотренной схеме была подтверждена экспериментами, в которых глубокая запись осуществлялась на тонкослойных голографических фотопластинках с использованием метода псевдоглубоких голограмм [36–38], а также в объемных светочувствительных материалах [39–41].

Метод безопорных селектограмм не является столь универсальным, как голография, и воспроизводит эффекты объемного восприятия только в горизонтальной плоскости. Данный метод не компенсирует влияние пространственной некогерентности рассеянного объектом излучения, что приводит к взаимному стиранию интерференционных картин, образованных излучением достаточно удаленных точек объекта. В то же время основным преимуществом метода является существенное снижение требований к когерентности излучения, используемого при записи и реконструкции селектограмм.

Проекция трехмерных изображений методом аспектов трехмерной сцены, сфокусированных в точки

Развитие систем проекции трехмерных изображений и создание трехмерных дисплеев, способных воспроизводить в реальном времени изображения движущихся объектов, остается важной проблемой современной оптической науки и технологии. Такие системы могут

найти применение в широкоэкранным телевидении, в качестве дисплеев компьютеров, в индустрии развлечений и т. д.

За основу создания системы проекции движущихся объектов был взят способ формирования целостного изображения из его фрагментов. В телевидении эта проблема решается за счет быстрого сканирования экрана одной единственной точкой. Впечатление целостного изображения возникает в данном случае благодаря тому, что зрительный аппарат человека обладает инерцией, длительность которой составляет порядка 0.05 с. Если светящаяся точка успевает оббежать экран за это время, то глаз запоминает все положения точки на экране, и в результате возникает иллюзия того, что на экране представлено целостное изображение объекта.

Принцип создания целостного изображения посредством быстрого сканирования пространства фрагментом этого изображения может быть применен и в случае проекции объемного изображения. Одной из возможностей синтеза объемных изображений посредством сканирования является предложенный Ю.Н. Денисюком с соавторами метод аспектов, сфокусированных в точки (АСТ-дисплей) [42–45]. Метод основан на применении лазерной техники, использующий только свойство лазерных пучков распространяться с очень малыми углами расходимости, что, в свою очередь, позволяет фокусировать эти пучки в малые точки. Такое важное свойство лазеров, как способность генерировать излучение с высокой степенью пространственной и временной когерентности, в данном случае не используется, поскольку АСТ-дисплей не воспроизводит распределение фаз волновых фронтов записанного им излучения. Отказ от воспроизведения соотношений фаз в удаленных друг от друга точках волнового поля света лежит в основе технических преимуществ данного метода.

Суть метода заключается в следующем. На первом этапе регистрируется система аспектов изображаемой сцены. Матрица создается сканирующим пучком лазера, в который в последовательном порядке вводятся полученные из разных точек пространства аспекты сцены. На этапе проекции аспекты просвечиваются сфокусированным в точку лазерным пучком. Сканируя экран, такой пучок образует матрицу светящихся точек, через каждую из которых виден один из аспектов трехмерной сцены. В результате наблюдатель видит локализованное на экране двумерное изображение, конфигурация которого изменяется в зависимости от точки наблюдения так же, как при наблюдении реального трехмерного объекта, и у наблюдателя возникает иллюзия трехмерности проецируемого изображения.

Метод хорошо сопрягаем с телевизионной техникой, способен воспроизводить горизонтальный и вертикальный параллаксы, эффект „оглядывания“ предметов, а также изменения конфигурации объектов. В настоящее время наиболее плодотворным подходом к созданию такого дисплея представляется ограничение проблемы

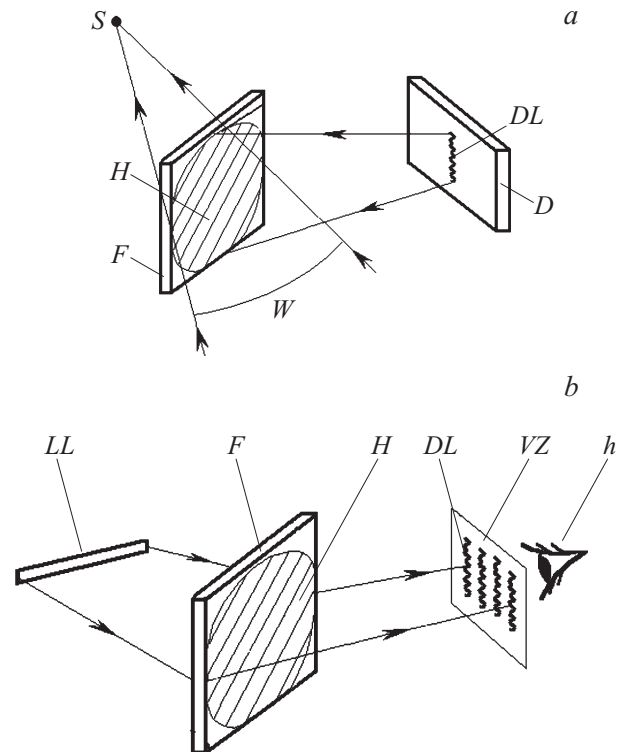


Рис. 5. Схема регистрации (a) и реконструкции (b) голографического экрана. *D* — диффузор, на который цилиндрической линзой проецируется узкая вертикальная полоска света *DL*; *W* — волновой фронт, сходящийся в точку *S* за светочувствительной пластинкой *F*; *H* — область регистрации голографического экрана; *LL* — линия расположения ракурсов трехмерной сцены; *VZ* — зона видения; *h* — наблюдатель.

формирования трехмерного изображения воспроизведением одного только горизонтального параллакса. Именно такой тип трехмерного изображения моделировался в эксперименте. Однако в этом случае зона видения, через которую наблюдатель может видеть изображение, трансформируется из квадратной в узкую горизонтальную полоску, наблюдение через которую весьма затруднено. Для того чтобы расширить эту полоску в вертикальном направлении, было предложено ввести в систему проекции специальный, так называемый одномерный диффузный экран [46,47].

Для реализации способа проекции трехмерных изображений с помощью сфокусированных в точки аспектов сцены был изготовлен специальный голограммный оптический элемент — голографический экран, который выполнял функции фокусировки и рассеяния света в вертикальном направлении одновременно [48]. Схема регистрации и реконструкции такого экрана представлена на рис. 5. Голографический экран обладает свойством трансформировать излучение, исходящее из точки *S*, в вертикальную диффузную полоску *DL*. При проекции трехмерного изображения через экран светящиеся точки, в которые сфокусированы различные ракурсы сцены, располагаются вдоль горизонтальной линии *LL*

(рис. 5, *b*). В соответствии со свойствами экрана каждая из этих точек проецируется в зону видения *VZ* в виде вертикальной светящейся диффузной полоски *DL*. Через каждую точку такой вертикальной полоски *DL* наблюдатель *h* видит изображение одного и того же аспекта, который проецировался через соответствующую ему точку горизонтальной полоски *LL*. Другие аспекты трехмерной сцены будут видны через соответствующие им вертикальные полоски *DL*. Таким образом, точки зоны видения *VZ* растягиваются в вертикальном направлении, что дает возможность наблюдать проецируемое изображение при значительном смещении глаза по вертикали.

Заключение

Фундаментальные идеи Ю.Н. Денисюка, заложенные им в основу голографической регистрации световых волн, получили широкое развитие и создали основу таких научных направлений, как динамическая голография, системы голографической памяти и голографических процессоров для распознавания образов, защитная голография, голограммные оптические элементы, системы технического зрения, изобразительная голография. Существенный прогресс наблюдается в области создания новых совершенных регистрирующих материалов.

Начиная с 2007 г., в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН трижды (в 2007, 2012 и 2017 гг.) проводился Всероссийский семинар „Юрий Николаевич Денисюк — основоположник отечественной голографии“. Семинар собирал большую аудиторию коллег и учеников Юрия Николаевича, продолжающих развивать идеи Денисюка и находящих новые области применения голографии. По решению Семинара в 2007 г. учреждена памятная медаль имени Ю.Н. Денисюка Оптического общества им. Д.С. Рождественского, которая вручается ученым за выдающиеся достижения в области голографии.

Список литературы

- [1] Денисюк Ю.Н. // ДАН СССР. 1962. Т. 144. № 6. С. 1275–1278.
- [2] Денисюк Ю.Н. // Опт. и спектр. 1963. Т. 15. № 4. С. 522–532.
- [3] Van Heerden P.J. // Appl. Opt. 1963. Vol. 2. N 4. P. 393–400.
- [4] Денисюк Ю.Н. // Опт. и спектр. 1965. Т. 18. Вып. 2. С. 276–283.
- [5] Lukosz W., Wüthrich O.A. // Opt. Commun. 1976. Vol. 19. N 2. P. 232–235.
- [6] Sihara T., Nihihara H., Kogata Y. // Opt. Commun. 1976. Vol. 19. N 3. P. 353–358.
- [7] Psaltis D., Brady D., Wagner K. // Appl. Opt. 1989. Vol. 27. N 9. P. 1752–1759.
- [8] Ovechko Y., Dunning G.L., Marrom E., Soffer B.N. // Appl. Opt. 1987. Vol. 26. N 10. P. 1900–1910.
- [9] Денисюк Ю.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 8. С. 84–89.
- [10] Денисюк Ю.Н. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 6. С. 59–66.
- [11] Denisyuk Yu.N., Ganzherli N.M. // Proceedings SPIE. 1989. Vol. 1238. P. 2–12.
- [12] Denisyuk Yu.N., Ganzherli N.M. // Optical Memory & Neural Networks. 1992. Vol. 1. N 1. P. 1–5.
- [13] Denisyuk Yu.N., Ganzherli N.M. // Opt. Eng. 1992. Vol. 31. N 4. P. 731–738.
- [14] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 2. С. 81–96.
- [15] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 14. С. 4–7.
- [16] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 11. С. 154–164.
- [17] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 15. С. 14–18.
- [18] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 6. С. 79–84.
- [19] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 1. С. 97–103.
- [20] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 4. С. 66–69.
- [21] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 8. С. 26–30.
- [22] Leith E.N., Upatnieks J. // Journ. Opt. Soc. Amer. 1964. Vol. 54. N 11. P. 1295–1299.
- [23] Benton S.A. // Journ. Opt. Soc. Amer. 1969. Vol. 59. N 10. P. 1545A.
- [24] Денисюк Ю.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 2. С. 15–20.
- [25] Denisyuk Yu.N., Ganzherli N.M. // Proceedings SPIE. 1993. Vol. 1732. P. 218–225.
- [26] Denisyuk Yu.N., Ganzherli N.M. // Opt. Eng. 1993. Vol. 32. P. 958–962.
- [27] Denisyuk Yu.N., Ganzherli N.M. // Proceedings SPIE. 1993. Vol. 2043. P. 224–235.
- [28] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 17. С. 81–85.
- [29] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. № 5. С. 1092–1108.
- [30] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 64. С. 124–137.
- [31] Denisyuk Yu.N., Ganzherli N.M. // Opt. Eng. 1994. Vol. 33. N 10. P. 3307–3314.
- [32] Cathey W.T. // USA. Patent 3415 587. December 10. 1968.
- [33] Caulfield H.J., Harris J.J., Cobb J.G. // II Proc. TERR 1967. V. 55. P. 1758.
- [34] Денисюк Ю.Н. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 2. С. 51–57.
- [35] Денисюк Ю.Н. // Опт. и спектр. 1995. Т. 79. № 5. С. 858–863.
- [36] Ganzherli N.M. // Proceedings SPIE. 1995. Vol. 2404. P. 357–363.
- [37] Ганжерли Н.М. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 8. С. 45–50.
- [38] Ганжерли Н.М., Денисюк Ю.Н. // Опт. и спектр. 1995. Т. 79. № 4. С. 670–674.
- [39] Денисюк Ю.Н., Савостьяненко Н.А. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 104–114.
- [40] Denisyuk Yu.N., Savostyanenko N.A. // Opt. Eng. 1996. Vol. 35. N 2. P. 554–569.
- [41] Denisyuk Yu.N., Ganzherli N.M., Savostyanenko N.A. // Proceedings SPIE. 1996. Vol. 2652. P. 188–195.

- [42] Денисюк Ю.Н. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 9. С. 92–95.
- [43] Denisyuk Y.N., Markov V.B., Ganzherli N.M. // Proceedings SPIE. 1997. Vol. 3011. P. 45–52.
- [44] Денисюк Ю.Н., Марков В.Б., Ганжерли Н.М. // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. № 1. С. 104–109.
- [45] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М., Орлов В.В., Бруй Е.Б., Савостьяненко Н.А. // Опт. и спектр. 1999. Т. 86. № 5. С. 864–872.
- [46] Denisyuk Yu.N., Orlov V.V., Brui E.B. // Proceedings SPIE. 1998. Vol. 3293. P. 78–82.
- [47] Ганжерли Н.М., Денисюк Ю.Н., Маурер И.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 22. С. 53–57.
- [48] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М., Черных Д.Ф. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 12. С. 101–103.