

Цифровая голография – от математической идеи до реальных приложений компьютерной оптики

С.Б. Одинок¹, Г.И. Грейсух², Г.Г. Левин³

¹МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская 5, стр.1, Москва, Россия, 105005

²Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Титова 28, Пенза, Россия, 440028

³Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), Озерная 46, Москва, Россия, 119361

Аннотация. В статье речь пойдет о достижениях советских и российских ученых в развитии дифракционной оптики и цифровой голографии. Также авторы анализируют современное состояние цифровой голографии как в традиционных направлениях, связанных с визуализацией в видимом диапазоне, так и путем освоения новых частотных диапазонов от рентгена до терагерцовых частот.

1. Введение

В истории науки ситуации, когда теоретическое обоснование какой-то прорывной идеи опережает появление технических средств ее воплощения, встречается довольно часто. Так сложилось и с физической голографией, идею которой высказал Д. Габор в 1949 г. задолго до появления лазеров и соответствующих средств записи интерференционных картин, а позже такая ситуация возникла и с цифровой голографией. Действительно, на момент, когда А. Ломан предложил заменить часть стадий голографического процесса, как теперь сказали бы, моделированием на ЭВМ, еще не существовало ни компьютеров с достаточной производительностью, ни устройств ввода-вывода изображений с необходимым разрешением. А сама идея [1-2] уйти от применения сложной и дорогой техники физической съемки голограмм, и к тому же обязательного требования наличия реального объекта съемки, была, как бы теперь сказали, очень креативной. Но, из-за отсутствия технических средств, все сводилось к формулам и демонстрационным примерам, не связанным с решением каких-либо реальных задач. Именно поэтому отношение к этим первым опытам по цифровой голографии в научном мире было довольно скептическим. Но, правда, тут можно вспомнить и пример с основателем отечественной школы физической голографии Ю. Н. Денисюком, также встретившим достаточно холодное отношение в «цитадели» советской физики ФИАНе.

2. Моделирование голографического процесса на ЭВМ в 60-70-х

В лаборатории «Голографии и когерентной оптики» Всесоюзного научно-исследовательского института оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) в конце 60-х годов была создана группа, которая занималась разработкой методов и алгоритмов по моделированию голографического процесса на ЭВМ. Это было связано с тем, что методы голографии, основанные на теории дифракции электромагнитных волн, были очень близки руководителю лаборатории – В.М. Гинзбург, и она инициировала эти работы и увлекла ими одного из авторов настоящей статьи. Основной задачей этой группы было восстановление на компьютере волновых полей с

голограмм, полученных в СВЧ и УЗВ диапазонах. В лаборатории также были решены задачи синтеза голограмм виртуальных трехмерных объектов на примере геофизических образований, полученных по данным сейсморазведки. Для этого в лаборатории было разработано устройство ввода-вывода изображений в ЭВМ БЭСМ-4 на базе фототелеграфного аппарата, которое позволило создавать первые синтезированные голограммы. Основные результаты работы этой группы были опубликованы в монографии [3], вышедшей в 1974 году под редакцией В.М. Гинзбург и Б.М. Степанова, в главе 6 – «Цифровая голография», а также в работе [109]. В дальнейшем работы этой группы были направлены на моделирование распознающих систем – голографических корреляторов и разработку оптических систем обработки информации.

Другая группа советских ученых, вплотную занявшаяся проблемами цифровой оптической голографии, возникла в Институте проблем передачи информации (ИППИ) АН СССР под руководством Л. П. Ярославского и включала безвременно ушедшего от нас Н. С. Мерзлякова, В. П. Карнаухова и некоторых других ученых. Монография [4], вышедшая в 1977г., была полностью посвящена вопросам записи цифровых оптических голограмм и восстановления с них оптических изображений для визуального наблюдения. Никаких значимых прикладных задач в монографии [4] не обсуждалось, но существовавший в то время в СССР «академический» стиль исследований позволял это. Тем не менее, у группы Л.П. Ярославского в то время уже появился один из первых в СССР персональный компьютер «Alpha» и, самое главное, сопряженное с ним высокоразрешающее устройство вывода изображений на фотопленку Photomation P-1700 американского производства. Именно с его помощью был сделан первый демонстрационный цифровой голографический фильм. Конечно, разрешение в 12,5 мкм по нынешним временам не впечатляет, но тогда эта цифра была уникальной. Уже позже появились: отечественный «Ромб» (по типу P-1700) и очень удачные оригинальные круговые лазерные записывающие системы [5] разработки Института автоматики и электрометрии (ИАиЭ) СО АН СССР, развивающиеся и активно используемые и в настоящее время [6-9].

Группа Л.П. Ярославского в то время занималась в основном общими вопросами цифровой голографии, включая изобразительные аспекты. В отличие от группы Л.П. Ярославского, только появившаяся тогда в Куйбышевском авиационном институте (КуАИ) группа В. А. Сойфера [10], подошла к использованию методов цифровой голографии с другой, более практической стороны. В это время бурно развивались методы Фурье-оптики, и весьма перспективным считалось направление, связанное с аналоговыми оптическими вычислениями, в частности корреляционные методы распознавания на основе голографических фильтров Ван дер Люгта. Именно эти задачи породили интерес В. А. Сойфера к методам цифровой голографии, в результате систематизации имевшихся на тот момент публикаций, в основном усилиями М. А. Голуба, внутренним изданием вышел обзор методов цифровой голографии, включавший обзор более 60 работ. В дальнейшем на базе этого обзора вышло учебное пособие В. А. Сойфера по применению цифровой голографии [11]. Первой практической задачей для группы В. А. Сойфера стало оптимальное представление случайных полей в базисе Карунена-Лоэва. При реализации базиса Карунена-Лоэва в виде оптических фильтров возникла проблема записи отрицательных значений функции пропускания, что закономерно привело к необходимости реализации этих фильтров голографическими методами. Расчет масок фильтров был проведен в вычислительном центре КуАИ, а далее записанные на магнитную ленту данные уже в Москве в ИППИ отображались на фотопленке. Таким же образом были изготовлены и транспаранты тестовых случайных полей. На тот момент необходимая оптомеханическая база в КуАИ находилась в процессе формирования, и первые результаты, опубликованные в работе [12], были получены в оптической лаборатории ИАиЭ при консультировании со стороны Е.С. Нежевенко.

Следующей актуальной задачей, требовавшей применения рассчитанных на ЭВМ элементов, стала задача контроля асферической оптики. Постановка задачи здесь была классическая с точки зрения цифровой голографии: создать оптический элемент, формирующий волновой фронт заданной формы. Почему такая задача возникла именно при контроле асферической оптики и не возникала раньше, ведь производство оптических

компонент существует несколько столетий? Действительно, пока речь шла о производстве объективов с относительно небольшой светосилой, для них вполне достаточно было применение сферических линз, контроль которых осуществляют сферическим волновым фронтом, естественным образом производимым точечным источником света. Но, когда дело касается светосильных объективов, больших астрономических зеркал и других оптических систем, включающих асферические поверхности, необходимого эталона для их контроля и аттестации в природе не существует. Вначале для решения таких задач применяли специальные компенсационные объективы весьма сложной конструкции, включавшие до 12 обычных сферических линз. Однако, расчет таких объективов и, самое главное, их проверка наталкивались на серьезные трудности, ведь эталона асферического волнового фронта не существовало. Самые ранние работы по этой проблеме в СССР проводились в Казани в ГИПО [13], где была разработана специальная круговая делительная машина, позволявшая нарезать алмазным резцом осевые, как их тогда называли, голограммы. Следует отметить, что с развитием данного направления элементы такого типа стали называть более общим термином «дифракционные оптические элементы» (ДОЭ), а название цифровые голограммы сохранилось, в основном, для элементов с несущей частотой, формирующих внеосевое полезное изображение.

3. Применение цифровой голографии в 80-90-е гг.

Несколько позже к развитию данного направления подключилась группа В.А. Сойфера, причем первый раз в кооперации с только что организованным тогда Институтом общей физики АН СССР (ИОФАН) под руководством нобелевского лауреата академика А.М. Прохорова. Постановка задачи, сформулированной Е. С. Живописцевым, была весьма интересной и предполагала использование теневого метода контроля асферических зеркал вместо традиционного интерферометрического. При этом цифровая голограмма – компенсатор – была предназначена для корректировки динамического диапазона теневой картины. Результаты были опубликованы в работе [14] в авторитетном журнале "Доклады Академии Наук СССР". В дальнейшем изготовленный тогда голограммный компенсатор удалось использовать и в интерференционной системе [15]. Следует отметить, что применявшиеся группой В. А. Сойфера методы, в отличие от применявшихся в ГИПО и несколько позже в ИАиЭ [16], позволяли делать и неосесимметричные элементы, пригодные для контроля внеосевых сегментов асферик [17]. Наибольшее развитие данная тематика получила в дальнейшем в ИАиЭ, где на базе разработанного лазерного фотопостроителя CLWS-200 (CLWS-300) успешно производили синтезированные голограммы, как для контроля асферических зеркал, так и компенсационных объективов [18]. Один из таким образом проконтролированных компенсационных объективов использовался при производстве главного зеркала телескопа обсерватории на горе Паломар (США).

Одним из знаковых применений цифровой голографии стали фокусаторы лазерного излучения, впервые предложенные в СССР только что возникшей тогда кооперацией КуАИ – ИОФАН. Локомотивом этого сотрудничества со стороны ИОФАН был тогда заведующий лабораторией колебаний И.Н. Сисакян, большой ученый и замечательный человек, которого уже более 20 лет, как нет с нами [19]. Идея фокусатора возникла в связи с набиравшей тогда популярность темой управляемого термоядерного синтеза. Одной из фундаментальных проблем, которую предстояло решить, было управление формой области фокусировки лазерного излучения, воздействующего на плазму. Тогда лишний раз подтвердился дар предвидения великого человека - академика А.М. Прохорова, который предложил осуществлять фокусировку лазерного излучения в заданные области пространства с помощью синтезированных на компьютере элементов, получивших название фокусаторов. Следует отметить два принципиальных отличия задачи фокусировки от традиционных задач цифровой голографии. Во-первых, это трехмерность создаваемых распределений и, во-вторых, требовалось создать заданное распределение интенсивности чисто фазовым элементом, причем основным критерием качества фокусировки была энергетическая эффективность. Первый фокусатор в продольный отрезок [20] был изготовлен по той же технологии, что и компенсатор,

и исследован в видимом диапазоне длин волн. В дальнейшем развивались как методы расчета [21-26], так и технологии производства фокусаторов [27-29]. Основное применение фокусаторы нашли в лазерных технологиях обработки материалов [30-33], оптическом приборостроении [34-36] и медицине [37-38]. Направление долгое время оставалось ведущим в группе В.А.Сойфера, поэтому, как следствие, в учебном пособии В. А. Сойфера [39] основное место занимает именно описание методов расчета фокусаторов и технологии их изготовления, хотя в постановочной части все же описаны основные методы кодирования цифровых голограмм.

Еще в работе [11] В.А. Сойфером начала продвигаться идея о разложении когерентно-оптических полей на ортогональные компоненты при помощи цифровых голограмм. Идея, вначале казавшаяся абстрактной, обрела актуальность и физический смысл лишь с началом совместных работ с ИОФАН. С.Г. Кривошлыков (ныне профессор в США, г. Бостон), работавший в то время в Лаборатории Колебаний ИОФАН (заведующий И. Н. Сисакян), занимавшийся волоконной оптикой, сразу оценил перспективы применения голографических фильтров для решения задачи измерения спектра поперечных мод волоконных световодов. Гауссовы моды удовлетворяют свойству ортогональности, но сами функции знакопеременные, что и приводит к необходимости использовать фильтры с комплексным пропусканием, то есть реализовывать их в виде голограмм. Сделать физические голограммы невозможно, поскольку физически получить можно лишь поля нескольких мод низших порядков, то есть в общем случае отсутствует объект голографирования. Именно возможность цифровой голограммы физически реализовывать то, что задано лишь математическим описанием, позволило говорить о решении поставленной задачи в общем виде [40]. Были изготовлены соответствующие пространственные фильтры, названные МОДАнами, и проведены натурные эксперименты по измерению мощностей отдельных поперечных мод в волоконных световодах [41-42]. Здесь следует упомянуть интересную аналогию с традиционной спектроскопией, впервые сформулированную В. А. Сойфером. Как появилось понятие хроматического спектра белого света? До изобретения спектрометра, разлагающего белый свет в спектр, понятие спектральных компонент, или продольных мод, носило абстрактный характер и обрело конкретику лишь с появлением такого элемента, как призма. Точно так же, с появлением МОДАнов реальностью стал спектр поперечных мод. Из всех перечисленных приложений цифровой голографии именно МОДАны в наибольшей степени соответствуют классическому подходу к синтезу цифровых голограмм. Большинство МОДАнов, в том числе фазовые [43-45], рассчитывают с несущей частотой. Также, метод наложения голограмм с несущей был впервые использован для реализации многоканальных МОДАнов [46]. Позже метод получил широкое распространение и для других элементов. Основными областями применения МОДАнов стали волоконно-оптические датчики [47-50] и многоканальная передача информации в оптическом волокне [51-54].

4. Современное состояние и развитие методов цифровой голографии

Концепция использования цифровых голограмм для модификации каналов связи нашла свое применение и для связи в свободном пространстве. Вихревые пучки дают как возможность мультиплексирования канала связи, так и обладают устойчивостью к случайным искажениям в среде распространения [55-57]. Методы обнаружения вихревых пучков при помощи синтезированных пространственных фильтров [58] основаны на корреляционной фильтрации. Именно инвариантность многоканальных корреляционных фильтров к сдвигу и стала основным мотивом применения таких фильтров для распознавания наборов вихревых пучков, прошедших через естественную искажающую среду [59-60]. В работах [59-60] как формирование исходных пучков, так и распознавание прошедших через случайную среду осуществлялось голографическими элементами с несущей частотой. Свойство цифровых голограмм формировать структурированные вихревые пучки оказалось весьма востребовано также для реализации класса поляризационных преобразований различными методами - с использованием анизотропных кристаллов [61-62], в интерферометрических системах [63-64], с использованием интерференционных поляризаторов [65-66]. Оказалось, также, что и для

распознавания поляризационных состояний векторных пучков возможно применение вихревого фазового фильтра, работающего в скалярном приближении [67].

На сегодня развитие методов цифровой голографии идет как в традиционных направлениях, связанных с визуализацией в видимом диапазоне [68-70], так и путем освоения новых частотных диапазонов от рентгена [71-72] до терагерцовых частот [73-74]. Последние достижения позволяют даже планировать использование ДОЭ в открытом космосе [75-78] для съемки изображений земной поверхности. При этом наличие современных методов цифровой обработки изображений [79-80] позволяет говорить о нивелировании такого известного недостатка ДОЭ, как высокий хроматизм.

Прогресс в развитии методов и технологий цифровой голографии позволил перейти к решению задач дифракционной нанофотоники [81-93], в частности, на новом уровне вернуться к проблеме аналоговых оптических вычислений [84-88], и созданию на этой основе прорывных информационных технологий [94].

В частности, методы цифровой голографии и компьютерного синтеза голограмм позволили по-новому: а) оценить системы голографической памяти и различных дисплеев, построение которых стало возможным без физической записи микроголограмм Фурье [95-96], б) рассмотреть возможность построения датчиков волнового фронта на основе различных компьютерно-синтезированных голограмм с их оперативным вводом в оптический канал на основе пространственных модуляторов света [97-98], в) синтезировать и записывать в защитных голограммах скрытые компьютерные голограммы с целью формирования скрытых кодированных изображений [99], г) создавать специализированные макеты устройств, реализующих новые эффективные методы записи и считывания голограмм, полученных на хромированных кварцевых подложках [99] и чисто кварцевых подложках [100].

С помощью компьютерно-синтезируемых ДОЭ сегодня на более высоком уровне решаются и традиционные для оптики задачи. Достаточно отметить прогресс в области совершенствования моно- и вариофокальных (zoom) оптических систем видимого (0.4-0.7 мкм), видимого и ближнего ИК (0.4-0.9 мкм) [101-108], среднего ИК (3-5 мкм) и двойного ИК (3.7-11 мкм) спектральных диапазонов [106-108]. В видимом и ближнем ИК диапазонах это, прежде всего, массовая оптика мобильных телефонов, смартфонов и планшетов, а также систем безопасности и технического зрения (в частности, беспилотных наземных, подводных и воздушных транспортных средств). В двойном ИК диапазоне, включающем среднее и дальнее ИК излучение, это оптика тепловизоров и приборов ночного видения различного назначения. Данная высококачественная оптика всех вышеперечисленных диапазонов может найти также применение и в медицинском приборостроении.

Идеи цифровой голографии, основанные на моделировании процессов дифракции и интерференции, в настоящее время получили дальнейшее развитие в оптическом приборостроении [110-111]. Повсеместная замена фотопластинки на электронный регистратор привела к тому, что методы восстановления волнового фронта из цифровых голограмм и интерферограмм полностью заменили оптическую реконструкцию. Современные цифровые голографические и интерференционные микроскопы, использующие цифровую реконструкцию, позволяют получить разрешение по глубине меньше ангстрема и широко применяются в нанотехнологиях [112-113]. Цифровая обработка волновых фронтов, основанная на методах голографии, позволила решить задачи дифракционной оптической томографии. Это дало возможность создать целый класс новых оптических приборов – оптических микротомографов для исследования клеток и клеточных структур в биологии и медицине [114].

5. Заключение

Авторы статьи не претендуют на абсолютную справедливость представленного обзора и вполне допускают, что было что-то упущено, поэтому заранее просят прощения у всей замечательной команды научного коллектива, много лет возглавляемого академиком РАН В.А. Сойфером, и желают всему коллективу дальнейших успехов в научных поисках и исследованиях.

6. Благодарность

Авторы данного обзора выражают благодарность за огромную информационную помощь, оказанную им со стороны д.ф.-м.н., профессора Казанского Н.Л. и д.ф.-м.н., доцента Карпеева С.В.

7. Литература

- [1] Lohmann, A.W. Binary Fraunhofer holograms, generated by computer / A.W. Lohmann, D.P. Paris // *Appl. Opt.* – 1967. – Vol. 6. – P. 1739-1748.
- [2] Brown, B.R. Computer-generated binary holograms / B.R. Brown, A.W. Lohmann // *IBM J. Res. Dev.* – 1969. – Vol.13. – P. 160-168.
- [3] Гинзбург, В.М. Голография. Методы и аппаратура / В.М. Гинзбург, Б.М. Степанов. – М.: Советское радио, 1974. – 376 с.
- [4] Ярославский, Л.П. Методы цифровой голографии / Л.П. Ярославский, Н.С. Мерзляков. – М.: Наука, 1977. – 192 с.
- [5] Poleshchuk, A.G. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure / A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, A.A. Kharissov, V.V. Cherkashin, V.P. Kiryanov, A.V. Kiryanov, S.A. Kokarev, A.G. Verhoglyad // *Appl. Opt.* – 1999. – Vol. 38(8). – P. 1295-1301. DOI: 10.1364/AO.38.001295.
- [6] Казанский, Н.Л. Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // *Компьютерная оптика.* – 2006. – Т. 29. – С. 58-77.
- [7] Veiko, V.P. Laser technologies in micro-optics. Part 1. Fabrication of diffractive optical elements and photomasks with amplitude transmission / V.P. Veiko, V.P. Korolkov, A.G. Poleshchuk, D.A. Sinev, E.A. Shakhno / *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* – 2017. Vol. 53(5). – P. 474-483. DOI: 10.3103/S8756699017050077.
- [8] Poleshchuk, A.G. Laser Technologies in Micro-Optics. Part 2. Fabrication of Elements with a Three-Dimensional Profile / A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov, V.P. Veiko, R.A. Zakoldaev, M.M. Sergeev // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* – 2018. – P. 54(2). – P. 113-126. DOI: 10.3103/S8756699018020012.
- [9] Kazanskiy, N.L. Technological line for creation and research of diffractive optical elements / N.L. Kazanskiy, R.V. Skidanov // *Proc. SPIE.* – 2019. – Vol. 11146. – P. 111460W. DOI: 10.1117/12.2527274.
- [10] Sokolov, V.O. On the 70th birthday of corresponding member of the Russian Academy of Sciences Victor A. Soifer // *CEUR Workshop Proceedings.* – 2015. – Vol. 1490. – P. 1-8. DOI: 10.18287/1613-0073-2015-1490-1-8.
- [11] Сойфер, В.А. Цифровая голография и ее применение – Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1978. – 86 с.
- [12] Голуб, М.А. Исследование пространственных фильтров, синтезированных на ЭВМ / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, Е.С. Нежевенко, В.А. Сойфер, В.И. Хоцкин // *Вопросы кибернетики.* – 1979. – № 62. – С. 56-63.
- [13] Ларионов, Н.П. Искусственная голограмма как оптический компенсатор / Н.П. Ларионов, А.В. Лукин, К.С. Мустафин // *Оптика и спектроскопия.* – 1972. – Т. 32, № 2. – С. 396-399.
- [14] Голуб, М.А. Получение асферических волновых фронтов при помощи машинных голограмм / М.А. Голуб, Е.С. Живописцев, С.В. Карпеев, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // *Доклады Академии Наук СССР.* – 1980. – Т.253, № 5. – С. 1104-1108.
- [15] Голуб, М.А. Экспериментальное исследование волновых фронтов, сформированных элементами компьютерной оптики / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // *Квантовая электроника.* – 1989. – Т. 16, № 12.- С. 2592-2593.
- [16] Полещук, А.Г. Методы оперативного контроля характеристик дифракционных и конформальных оптических элементов в процессе изготовления / А.Г. Полещук, В.П. Корольков, Р.К. Насыров, В.Н. Хомутов, А.С. Конченко // *Компьютерная оптика.* – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 818-829.

- [17] Golub, M.A. Wave Fronts Forming By Computer Generated Optical Elements / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Proc. SPIE. – 1990. – Vol. 1183. – P. 727-750. DOI: 10.1117/12.963891.
- [18] Asfour, J.-M. Asphere testing with a Fizeau interferometer based on combined computer generated hologram / J.-M. Asfour, A.G. Poleshchuk // Journal of Optical Society of America A. – 2006. – Vol. 23(1). – P. 172-178.
- [19] Danilov, V.A. 20 years without Iosif Norairovich Sissakian / V.A. Danilov, N.I. Petrov // CEUR Workshop Proceedings, 2016. – Vol. 1638. – P. 223-235.
- [20] Голуб, М.А. Фокусировка когерентного излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Письма в ЖТФ . – 1981. – Т. 7, № 10. – С. 618-623.
- [21] Голуб, М.А. Дифракционный расчет оптического элемента, фокусирующего в кольцо / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Автометрия. – 1987. – Т. 6. – С. 8-15.
- [22] Golub, M.A. Computational experiment with plane optical elements / M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 1988. – Vol. 1. – P. 70-82.
- [23] Kazanskiy, N.L. Diffraction investigation of geometric-optical focusators into segment / N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // Optik. – 1994. – Vol. 96(4). – P. 158-162.
- [24] Doskolovich, L.L. Software on diffractive optics and computer generated holograms / L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, A.G. Khramov, V.S. Pavelyev, P.G. Seraphimovich, V.A. Soifer, S.G. Volotovskiy // Proceedings of SPIE. – 1995. – Vol. 2363. – P. 278-284. DOI: 10.1117/12.199645.
- [25] Doskolovich, L.L. Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // Optik. – 1995. – Vol. 101, № 2. – P. 37-41.
- [26] Golub, M.A. Infra-red radiation focusators / M.A. Golub, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15. – P. 297-309.
- [27] Kazanskiy, N.L. Fabricating and testing diffractive optical elements focusing into a ring and into a twin-spot / N.L. Kazanskiy, G.V. Uspleniev, A.V. Volkov // Proceedings of SPIE. – 2000. – Vol. 4316. – P. 193-199. DOI: 10.1117/12.407678.
- [28] Казанский, Н.Л. Формирование микрорельефа методом термического окисления пленок молибдена / Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев, С.Д. Полетаев // Письма в Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, № 3. – С. 106-110.
- [29] Kazanskiy, N.L. Optical Materials: Microstructuring Surfaces with Off-Electrode Plasma / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov – CRC Press, 2017. – 212 p. DOI: 10.1201/b21918.
- [30] Шорин, В.П. Технологические возможности применения фокусаторов при лазерной обработке материалов / И.Н. Сисакян, В.П. Шорин, В.А. Сойфер, В.И. Мордасов, В.В. Попов // Компьютерная оптика. – 1988. – № 3. – С. 94-97.
- [31] Doskolovich, L.L. Focusators for laser-branding / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, G.V. Usplenjev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 311-322. DOI: 10.1016/0143-8166(91)90018-0.
- [32] Kazanskiy, N.L. Synthesis of nanoporous structures in metallic materials under laser action / N.L. Kazanskiy, S.P. Murzin, Ye.L. Osetrov, V.I. Tregub // Optics and Lasers in Engineering. – 2011. – Vol. 49(11). – P. 1264-1267. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2011.07.001.
- [33] Murzin, S.P. Laser welding of dissimilar metallic materials with use of diffractive optical elements / S.P. Murzin, G. Liedl // Computer Optics. – 2017. – Vol. 41(6). – P. 848-855. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-848-855.
- [34] 3D laser inspection of fuel assembly grid spacers for nuclear reactors based on diffractive optical elements / L.V. Finogenov, Yu.A. Lemeshko, P.S. Zav'yalov, Yu.V. Chugui // Measurement and Science Technology. – 2007. – Vol. 18(6). – P. 1779-1785.

- [35] Kazanskiy, N. Binary beam splitter / N. Kazanskiy, R. Skidanov // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51(14). – P. 2672-2677. DOI: 10.1364/AO.51.002672.
- [36] Казанский, Н.Л. Связь фазовой проблемы в оптике, фокусировки излучения и задачи Монжа–Канторовича / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, И.Н. Козлова, М.А. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 574-587.
- [37] Баум, О.И. Новые методы биофотоники для повышения эффективности и безопасности лазерных технологий модификации фиброзной оболочки глаза / О.И. Баум, А.И. Омельченко, Е.М. Касьяненко, Р.В. Скиданов, Н.Л. Казанский, Э.Н. Соболев, А.В. Большунов, В. И. Сипливый, Г.А. Осипян, А.А. Гамидов, С.Э. Аветисов // *Вестник офтальмологии*. – 2018. – Т. 134, № 5. – С. 4-14. DOI: 10.17116/oftalma20181340514.
- [38] Баум, О.И. Формирование контролируемого пространственного распределения лазерного излучения для коррекции формы и рефракции роговицы глаза / О.И. Баум, А.И. Омельченко, Е.М. Касьяненко, Р.В. Скиданов, Н.Л. Казанский, Э.Н. Соболев, А.В. Большунов, С.Э. Аветисов, В.Я. Панченко // *Квантовая электроника*. – 2020. – Т. 50, № 1. – С. 87-93.
- [39] Соيفер, В.А. Введение в дифракционную микрооптику – Самара: Самарский государственный авиационный университет, 1996. – 93 с.
- [40] Голуб, М.А. Синтез пространственных фильтров для исследования поперечно-модового состава когерентного излучения / М.А. Голуб, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // *Квантовая электроника*. – 1982. – Т. 9, № 9. – С. 1866-1868.
- [41] Голуб, М.А. Экспериментальное исследование пространственных фильтров, разделяющих поперечные моды оптических полей / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, С.Г. Кривошлыков, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // *Квантовая Электроника*. – 1983. – Т. 10, № 8. – С. 1700-1701.
- [42] Голуб, М.А. Экспериментальное исследование распределения мощности по поперечным модам в волоконном световоде с помощью пространственных фильтров / М.А. Голуб, С.В. Карпеев, С.Г. Кривошлыков, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // *Квантовая электроника*. – 1984. – Т. 11, № 9. – С. 1869-1871.
- [43] Голуб, М.А. Фазовые пространственные фильтры, согласованные с поперечными модами / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, С.В. Карпеев, А.В. Мирзов, Г.В. Уваров // *Квантовая электроника*. – 1988. – Т. 15, № 3. – С. 617-618.
- [44] Berezny, A.E. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography / A.E. Berezny, S.V. Karpeev, G.V. Uspleniev // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1991. – Vol. 15. – P. 331-340.
- [45] Khonina, S.N. Generation of rotating Gauss-Laguerre modes with binary-phase diffractive optics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M. Honkanen, J. Lautanen, J. Turunen // *Journal of Modern Optics*. – 1999. – Vol. 46(2). – P. 227-238. DOI: 10.1080/09500349908231267.
- [46] Аджалов, В.И. Многоканальные элементы компьютерной оптики, согласованные с группами мод / В.И. Аджалов, М.А. Голуб, С.В. Карпеев, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // *Квантовая электроника*. – 1990. – Т. 17, № 2. – С. 177-181.
- [47] Garitchev, V.P. Experimental investigation of mode coupling in a multimode graded-index fiber, caused by periodic microbends using computer-generated spatial filters / V.P. Garitchev, M.A. Golub, S.V. Karpeev, S.G. Krivoslykov, N.I. Petrov, I.N. Sissakian, V.A. Soifer, W. Haubenreisser, J.-U. Jahn, R. Willsch // *Optics Communication*. – 1985. – Vol. 55(6). – P. 403-405. DOI: 10.1016/0030-4018(85)90140-3.
- [48] Soifer, V.A. Laser beam mode selection by computer generated holograms / V.A. Soifer, M.A. Golub – Boca Raton, USA: CRC Press, 1994.
- [49] Karpeev, S.V. Fibre sensors based on transverse mode selection / S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, A.V. Gavrilov, V.A. Erolov // *Journal of Modern Optics*. – 2007. – Vol. 54(6). – P. 833-844. DOI: 10.1080/09500340601066125.

- [50] Butt, M.A. Optical elements based on silicon photonics / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Computer Optics*. – 2019. – Vol. 43(6). – P. 1079-1083. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1079-1083.
- [51] Soifer, V.A. Realisation of an optical interconnection concept using transversal mode selection / V.A. Soifer, S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev, M. Duparre, B. Luedge // *Proc. SPIE*. – 2000. – Vol. 4316. – P. 152-162.
- [52] Karpeev, S.V. Mode multiplexing by diffractive optical elements in optical telecommunication / S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, M. Duparre, B. Luedge // *Proc. SPIE*. – 2004. – Vol. 5480. – P. 153-165.
- [53] Karpeev, S.V. Steplike Fiber Modes Excitement with Binary Phase DOEs / S.V. Karpeev, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. – 2005. – Vol. 14(4). – P. 223-228.
- [54] Любопыттов, В.С. Математическая модель детектирования параметров распространения мод в оптическом волокне при маломодовом режиме для адаптивной оптической компенсации смещения мод / В.С. Любопыттов, А.З. Тлявлин, А.Х. Султанов, В.Х. Багманов, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 352-359.
- [55] Soifer, V.A. Vortex beams in turbulent media: review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepakina // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605- 624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
- [56] Porfirev, A.P. Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium / A.P. Porfirev, M.S. Kirilenko, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56(11). – P. E8-E15. DOI: 10.1364/AO.56.0000E8.
- [57] Карпеев, С.В. Сравнение устойчивости вихревых пучков Лагерра–Гаусса к случайным флуктуациям оптической среды / С.В. Карпеев, В.Д. Паранин, М.С. Кириленко // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 208-217. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-208-217.
- [58] Kotlyar, V.V. Light field decomposition in angular harmonics by means of diffractive optics / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1998. – Vol. 45(7). – P. 1495-1506. DOI: 10.1080/09500349808230644.
- [59] Khonina, S.N. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Paraniin // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 68-74. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.006.
- [60] Карпеев, С.В. Возможности передачи и детектирования модулированных пучков с длиной волны 1530 нм в условиях случайных флуктуаций среды распространения / С.В. Карпеев, В.В. Подлипнов, Н.А. Ивлиев, В.Д. Паранин // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 368-375. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-368-375.
- [61] Khonina, S.N. Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, V.A. Soifer // *Journal of Optics*. – 2015. – Vol. 17(6). – P. 065001. DOI: 10.1088/2040-8978/17/6/065001.
- [62] Khonina, S.N. Implementation of ordinary and extraordinary beams interference by application of diffractive optical elements / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.A. Morozov, V.D. Paraniin // *J Mod Opt*. – 2016. – Vol. 63(13). – P. 1239-1247. DOI: 10.1080/09500340.2015.1137368.
- [63] Карпеев, С.В. Формирование поляризационно-неоднородных лазерных пучков высокого порядка на основе пучков с круговой поляризацией / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 224-230.
- [64] Khonina, S.N. Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37(12). – P. 2385-2387.
- [65] Karpeev, S. Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer / S. Karpeev, V. Paraniin, S. Khonina // *J Opt*. – 2017. – Vol. 19(5). – P. 055701. DOI: 10.1088/2040-8986/aa640c.

- [66] Подлипов, В.В. Полностью симметричный дифракционно-интерференционный формирователь радиально-поляризованных пучков с длиной волны 1530 нм / В.В. Подлипов, С.В. Карпеев, В.Д. Паранин // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 577-585. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-577-585.
- [67] Khonina, S.N. Recognition of polarization and phase states of light based on the interaction of nonuniformly polarized laser beams with singular phase structures / S.N. Khonina, A.P. Porfirev, S.V. Karpeev // Optics Express. – 2019. – Vol. 27(13). – P. 18484-18492. DOI: 10.1364/OE.27.018484.
- [68] Корешев, С.Н. Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства / С.Н. Корешев, Д.С. Смородинов, О.В. Никаноров // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 793-801. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801.
- [69] Корешев, С.Н. Распределение комплексной амплитуды и интенсивности в трёхмерной фигуре рассеяния, формируемой оптической системой при осевом расположении точечного объекта / С.Н. Корешев, Д.С. Смородинов, О.В. Никаноров, М.А. Фролова // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 377-384. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-377-384.
- [70] Евтихийев, Н.Н. Применение дополнительных входных амплитудных масок в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением / Н.Н. Евтихийев, В.В. Краснов, П.А. Черёмхин, А.В. Шифрина // Компьютерная оптика. – 2017 – Т. 41, № 3. – С. 391-398. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-391-398.
- [71] Котляр, В.В. Зонная пластинка на мембране для жёсткого рентгеновского излучения / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, М.И. Шанина, В.А. Соيفер, Л. О'Фаолейн // Компьютерная Оптика. – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 36-41.
- [72] Котляр, В.В. Исследование фокусирующих свойств зонной пластинки для жёсткого рентгеновского излучения / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, М.И. Шанина, В.А. Соифер, Л. О'Фаолайн, Е.В. Минеев, И.В. Якимчук, В.Е. Асадчиков // Компьютерная Оптика. – 2012. – Т. 36, № 1. – С. 65-71.
- [73] Knyazev, V. Generation of terahertz surface plasmon polaritons using nondiffractive bessel beams with orbital angular momentum / V. Knyazev, Y. Choporova, M. Mitkov, V. Pavelyev, B. Volodkin // Physical Review Letters. – 2015. – Vol. 115. – P. 163901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.163901.
- [74] Volodkin, B. Fabrication and characterization of diffractive phase plates for forming high-power terahertz vortex beams using free electron laser radiation / B. Volodkin, Y. Choporova, V. Knyazev, G. Kulipanov, V. Pavelyev, V. Soifer, N. Vinokurov // Opt. Quant. Electron. – 2016. – Vol. 48. – P. 223.
- [75] Kazanskiy, N.L. Modeling the performance of a spaceborne hyperspectrometer based on the Offner scheme / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, L.L. Doskolovich, A.V. Pavelyev // Computer Optics. – 2015. – Vol. 39(1). – P. 70-76. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-1-70-76.
- [76] Соифер, В.А. Нанофотоника и ее применение в системах ДЗЗ – Самара: Новая техника, 2016. – 384 с.
- [77] Soyfer, V.A. Insertion into Geostationary Orbit of a Spacecraft with Diffractive Orbit by Low Torque Electric Propulsion / V.A. Soyfer, V.V. Salmin, S.V. Karpeev, A.S. Chetverikov, K.V. Peresyarkin, I.S. Tkachenko // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 185. – P. 332-337.
- [78] Kazanskiy, N.L. Modeling diffractive optics elements and devices // Proc. SPIE. – 2018. – Vol. 10774. – P. 1077400. DOI: 10.1117/12.2319264.
- [79] Nikonorov, A.V. Toward Ultralightweight Remote Sensing with Harmonic Lenses and Convolutional Neural Networks / A.V. Nikonorov, M.V. Petrov, S.A. Bibikov, P.Y. Yakimov, V.V. Kutikova, Y.V. Yuzifovich, A.A. Morozov, R.V. Skidanov, N.L. Kazanskiy // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 11(9). – P. 3338-3334. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2856538.

- [80] Никоноров, А.В. Реконструкция изображений в дифракционно-оптических системах на основе сверточных нейронных сетей и обратной свертки / А.В. Никоноров, М.В. Петров, С.А. Бибииков, В.В. Кутикова, А.А. Морозов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 875-887. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-875-887.
- [81] Bezus, E.A. Design of diffractive lenses for focusing surface plasmons / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov // Journal of Optics. – 2010. – Vol. 12. – P. 015001. DOI: 10.1088/2040-8978/12/1/015001.
- [82] Bezus, E.A. Scattering in elements of plasmon optics suppressed by two-layer dielectric structures / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // Technical Physics Letters. – 2011. – Vol. 37(12). – P. 1091-1095. DOI: 10.1134/S1063785011120030.
- [83] Bezus, E.A. Scattering suppression in plasmonic optics using a simple two-layer dielectric structure / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Applied Physics Letters. – 2011. – Vol. 98(22). – P. 221108. DOI: 10.1063/1.3597620.
- [84] Kazanskiy, N.L. Use of photonic crystal cavities for temporal differentiation of optical signals / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.N. Khonina // Optics Letters. – 2013. – Vol. 38(7). – P. 1149-1151. DOI: 10.1364/OL.38.001149.
- [85] Bykov, D.A. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, V.A. Soifer // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(21). – P. 25084-25092.
- [86] Kazanskiy, N.L. Coupled-resonator optical wave-guides for temporal integration of optical signals / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // Optics Express. – 2014. – Vol. 22(11). – P. 14004-14013. DOI: 10.1364/OE.22.014004.
- [87] Emelyanov, S.V. Differentiating space-time optical signals using resonant nanophotonics structures / S.V. Emelyanov, D.A. Bykov, N.V. Golovastikov, L.L. Doskolovich, V.A. Soifer // Doklady Physics. – 2016. – Vol. 61(3). – P. 108-111.
- [88] Головастиков, Н.В. Дифференцирование и интегрирование трёхмерного оптического импульса во времени с использованием брэгговских решёток с дефектным слоем / Н.В. Головастиков, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 1. – С. 13-21. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-1-13-21.
- [89] Egorov, A.V. Using coupled photonic crystal cavities for increasing of sensor sensitivity / A.V. Egorov, N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // Computer Optics. – 2015. – Vol. 39(2). – P. 158-162. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-158-162.
- [90] Serafimovich, P.G. Optical modulator based on coupled photonic crystal cavities / P.G. Serafimovich, N.L. Kazanskiy // Journal of Modern Optics. – 2016. – Vol. 63(13). – P. 1233-1238. DOI: 10.1080/09500340.2015.1135258.
- [91] Degtyarev, S. Metasurfaces with continuous ridges for inverse energy flux generation / S. Degtyarev, D. Savelyev, S. Khonina, N. Kazanskiy // Optics Express. – 2019. – Vol. 27(11). – P. 15129-15135. DOI: 10.1364/OE.27.015129.
- [92] Doskolovich, L.L. Resonant properties of composite structures consisting of several resonant diffraction gratings / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, D.A. Bykov, N.V. Golovastikov, V.A. Soifer // Optics Express. – 2019. – Vol. 27. – P. 25814-25828.
- [93] Soifer, V.A. Diffractive optical elements in nanophotonics devices / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, L.L. Doskolovich // Computer Optics. – 2009. – Vol. 33(4). – P. 352-368.
- [94] Soifer, V.A. Diffractive nanophotonics and advanced information technologies // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 84(1). – P. 9-18. DOI: 10.1134/S1019331614010067.
- [95] Бетин, А.Ю. Метод компьютерного синтеза и проекционной записи микроголограмм для систем голографической памяти: математическое моделирование и экспериментальная реализация / А.Ю. Бетин, В.И. Бобринев, Н.Н. Евтихийев, А.Ю. Жердев, Е.Ю. Злоказов, Д.С. Лушников, В.В. Маркин, С.Б. Одинокоев, С.Н. Стариков, Р.С. Стариков // Квантовая электроника. – 2013. – Vol. 43(1). – P. 87-89.
- [96] Betin, A.Y. A combination of computer-generated fourier holograms and light guide substrate with diffractive optical elements for optical display and sighting system / A.Y. Betin, S.S.

- Donchenko, M.S. Kovalev, S.B. Odinkov, A.B. Solomashenko, E.Y. Zlokazov // *Digital Holography & 3-D Imaging Meeting, OSA Technical Digest*, 2015. – P. 410.
- [97] Kovalev, M.S. Measurement of wavefront curvature using computer-generated holograms / M.S. Kovalev, G.K. Krasin, S.B. Odinkov, A.B. Solomashenko, E.U. Zlokazov // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27(2). – P. 1563-1568.
- [98] Ruchka, P.A. On the Possibilities of Encoding Digital Images using Fractional Fourier Transform / P.A. Ruchka, M.L. Galkin, M.S. Kovalev, G.K. Krasin, N.G. Stsepuro, S.B. Odinkov // *Optical Memory and Neural Networks*. – 2019. – Vol. 28(4). – P. 252-261.
- [99] Odinkov, S.B. Influence of the skin effect on the structure of relief-phase optical elements obtained by plasma-chemical etching / S.B. Odinkov, G.R. Sagatelyan, M.S. Kovalev, K.N. Bugorkov // *Journal of Optical Technology*. – 2019. – Vol. 86(9). – P. 596-602. DOI: 10.1364/JOT.86.000596.
- [100] Odinkov, S.B. Features of the plasma-chemical etching of quartz glass during the formation of deep surface relief on high-precision components of devices / S.B. Odinkov, G.R. Sagatelyan, M.S. Kovalev, K.N. Bugorkov // *Journal of Optical Technology*. – 2019. – Vol. 86(5). – P. 317-322. DOI:10.1364/JOT.86.000317.
- [101] Greisukh G.I. Design of achromatic and apochromatic plastic microobjectives / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, I.A. Levin, S.A. Stepanov // *Applied Optics*. – 2010. – Vol. 49(23). – P. 4379-4384.
- [102] Грейсух, Г.И. Расчёт пластмассово-линзовых микрообъективов суперахроматов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, И.А. Левин, С.А. Степанов // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т.35, № 4. – С. 473-479.
- [103] Greisukh, G.I. Design of plastic diffractive-refractive compact zoom lenses for visible-near-IR spectrum / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, Z.A. Sidiyakina, S.A. Stepanov // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52(23). – P. 5843-5850.
- [104] Грейсух, Г.И. Компоновка и расчет рефракционно-дифракционного объектива перископического типа для мобильного устройства связи / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // *Оптический журнал*. – 2016. – Т. 83, № 11. – С. 51-57.
- [105] Greisukh, G.I. Diffractive elements for imaging optics of mobile communication devices / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.V. Kazin, S.A. Stepanov // *Computer Optics*. – 2017. – Vol. 41(4). – P. 581-584. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-581-584.
- [106] Грейсух Г.И. Одно- и многослойные киноформные элементы для компактных объективов среднего ИК диапазона / Г.И. Грейсух, А.И. Антонов, Е.Г. Ежов // *Оптический журнал*. – 2019. – Т. 86, № 6. – С. 1-4.
- [107] Грейсух, Г.И. Коррекция хроматизма вариообъективов среднего ИК-диапазона / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, А.И. Антонов // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 544-549. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-544-549.
- [108] Грейсух, Г.И. Коррекция хроматизма двухдиапазонных ИК-вариообъективов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, А.И. Антонов // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 2 (в печати).
- [109] Гинзбург, В.М. Моделирование голографического процесса на ЭВМ / В.М. Гинзбург, Г.Г. Левин, С.П. Толпина // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 1972. – Т. 12, № 4. – С. 1007-1077.
- [110] Заборов, А.Н. Голографические методы визуализации математически заданных трехмерных объектов / А.Н. Заборов, Г.Г. Левин // *Оптика и спектроскопия*. – 1983. – Т. 55, № 1. – С. 808-814.
- [111] Vishnyakov, G. Advanced method of phase shift measurement from variances of interferogram differences / G. Vishnyakov, G. Levin, V. Minaev, N. Nekrasov // *Appl. Optics*. – 2015. – Vol. 54(15). – P. 4797-4804.
- [112] Вишняков, Г.Н. Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине. Численное моделирование / Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин, В.Л. Минаев, И.Ю. Цельмина // *Оптика и спектроскопия*. – 2013. – Т. 115, № 6. – С.1039-1046.

- [113] Вишняков, Г.Н. Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине. Экспериментальные результаты / Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин, В.Л. Минаев, И.Ю. Цельмина // Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т. 116, № 1. – С. 170-175.
- [114] Vishnyakov, G. Differential interference contrast tomography / G. Vishnyakov, G. Levin, V. Minaev, M. Latushko, N. Nekrasov, V. Pickalov // Opt. Lett. – 2016. – Vol. 41. – P. 3037-3040.

Digital holography: from a mathematical idea to actual computer optics applications

S.B. Odinkov¹, G.I. Greisukh², G.G. Levin³

¹Bauman Moscow State Technical University, 2-nd Baumanskaya, 5, bld. 1, Moscow, Russia, 1050052

²Penza State University of Architecture and Construction, 28 Titova St., Penza, Russia, 440028

³All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, 46 Ozernaya St., Moscow, Russia, 119361

Abstract. The article focuses on the achievements of Soviet and Russian scientists in the development of diffraction optics and digital holography. The authors also analyze the current status of digital holography regarding both the traditional areas related to visualization in the visible range, and the development of new frequency ranges from x-rays to terahertz frequencies.