

Создание фокусаторов лазерного излучения

В.А. Данилов¹

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Бутлерова 15, Москва, Россия, 117342

Аннотация. В статье последовательно анализируется развитие физико-математического аппарата и технологических основ создания фокусаторов лазерного излучения - ключевого элемента компьютерной оптики, во много определившего облик нового научного направления и формирование используемых в нем подходов. Анализируется влияние разработки методов расчета фокусаторов на создание других элементов компьютерной оптики. Приводятся примеры эффективного применения фокусаторов.

1. Введение

Задача формирования изображений с заданным распределением интенсивности восходит к работам Р. Герчберга, В. Сэкстона, Дж. Фиенапа (Gerchberg R.W., Saxton W.D., Fienup J.R.) [1-4]. В этих работах для формирования изображения предложено использовать голограммы, полученные с помощью компьютера. О. Брингдал и В. Ли (Bryngdahl O., Lee W.H.) в своей работе [5], опубликованной в 1976 году, предложили устройство для сканирования лазерного пучка, в котором использовался голографический элемент, рассчитанный с помощью компьютера. Появление оптических элементов данного класса было закономерным результатом развития методов цифровой голографии [6-8].

Дифракционная компьютерная оптика развивается более 40 лет, начиная с основополагающих работ А.М. Прохорова, И.Н. Сисакяна, В.А. Сойфера и их коллег [9-28]. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) представляют собой пропускающие или отражающие пластинки, работающие на основе дифракции на оптическом микрорельефе. За прошедшие годы решены фундаментальные задачи фокусировки, селекции мод лазерного излучения, формирования бездифракционных пучков. ДОЭ нашли применение в лазерных технологических установках, оптических устройствах хранения и записи информации.

Развитие лазерной техники и технологии привело к созданию новых оптических элементов, использование которых позволяло увеличить скорость, улучшить качество лазерной обработки материалов по сравнению с использованием систем линз и дефлекторов. Для решения целого класса практических задач, возникающих в лазерной технике, было предложено использовать фазовые оптические элементы, которые по инициативе академика А.М. Прохорова были названы фокусаторами [10-11, 13-15, 17-53]. Они позволяют сформировать требуемое распределение энергии в заданной области пространства. Ключевой проблемой при создании фокусаторов является одновременное достижение высокой энергетической эффективности и точности формирования заданного распределения интенсивности. Были получены решения задач фокусировки в приближении тонкого оптического элемента и геометрической оптики, большое внимание уделялось патентованию фокусаторов [13, 18-20, 31].

Одним из первых был рассмотрен фокусатор в отрезок, лежащий на оси перпендикулярно к плоскости фокусатора [10, 13, 24-26, 32-33].

Особое внимание уделялось расчету радиально-симметричных ДОЭ [10, 13, 23-26, 29, 32-33, 54]. Наряду со сферической линзой, фокусирующей свет в точку, широко применяются на практике оптические элементы, фокусирующие свет в кольцо. Имеется ряд работ, посвященных исследованию фокусировки в кольцо с фазовыми функциями, полученными различными методами.

Далее появилось множество работ, посвященных фокусировке когерентного излучения в произвольную фокальную кривую в приближении геометрической оптики [14-15, 18-19, 30-31, 33-39]. Фокальные кривые представляют собой огибающие семейства лучей. В данном приближении прохождение света через дифракционный оптический элемент описывается в рамках геометрической оптики, и кривая, в окрестности которой происходит фокусировка, представляется как полоса, имеющая нулевую ширину. Распределение энергии в фокальной области в этом случае характеризуется линейной плотностью. Понятие линейной плотности является математической абстракцией и не учитывает дифракционные эффекты. Теорема существования решения задачи фокусировки в произвольную фокальную кривую сформулирована и доказана А.В. Гончарским и В.В. Степановым [35].

Работы [36-39], посвящены расчету фокусаторов в набор кривых, в том числе, состоящих из дуг окружностей и отрезков прямой. Решению задачи фокусировки излучения заданного набора длин волн посвящены работы [40, 54-56].

Для решения различных задач лазерной технологии требуются оптические элементы, фокусирующие в различные двумерные области с заданным распределением интенсивности [20, 41, 57-59]. При попытке сфокусировать излучение в двумерную область задача резко усложняется, так как её решение сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения в частных производных (уравнения Монжа-Ампера). В работах [20, 41] приведено решение для случая фокусировки в прямоугольник с равномерным распределением интенсивности. Предложен численный метод решения уравнения Монжа-Ампера в случае фокусировки в более сложные области на базе решения задачи фокусировки в прямоугольник [57]. Имеются работы, посвященные расчету ДОЭ, создающих заданное распределение интенсивности на поверхности вращения [42].

Имеется также ряд работ, посвященных расчету дифракционных, отражающих и френелевских элементов, формирующих заданную диаграмму направленности излучения [60-70].

Развитие методов расчета привело к появлению алгоритмов, учитывающих дифракционную ширину кривой. В работах [45-52] был предложен метод расчета фокусатора в фокальный отрезок на основе дифракционной аппроксимации оператора распространения света. К этим публикациям идеологически примыкают работы, посвященные индивидуальной фокусировке в разных дифракционных порядках, в том числе учитывающие квантование фазовой функции, возникающее при литографических методах формирования дифракционного микрорельефа [40, 46, 54, 71-74].

Кроме методов расчета, основанных на приближении геометрической оптики, существует большое количество работ, основанных на различных итерационных алгоритмах [24, 75-84]. Методы данного класса носят достаточно универсальный характер. Они позволяют рассчитать ДОЭ, фокусирующие в области сложной формы. Основное достоинство состоит в том, что эти методы легко поддаются алгоритмизации. Однако при реализации возникают трудности, связанные с многократным выполнением операции двумерного преобразования Фурье (или Френеля) для больших массивов данных. Кроме того, полученное решение не обладает достаточной степенью гладкости, что, в свою очередь, затрудняет изготовление ДОЭ.

Другой часто применяемый метод решения обратных задач фокусировки электромагнитного излучения заключается в решении исходного нелинейного интегрального уравнения, связывающего распределение интенсивности в фокальной плоскости с фазовой функцией оптического элемента, методом минимизации функционала невязки [85-87].

2. Аналитические методы моделирования

Использование ДОЭ для решения задач лазерной технологии требует развития новых методов моделирования работы дифракционных оптических элементов. Аналитическое решение задач дифракции в терминах специальных функций возможно только для простейших случаев, например, дифракции на полуплоскости, щели в проводящем экране, проводящей ленте [88-89]. Для расчета дифракции электромагнитных волн на шаре, цилиндре, эллипсоиде применяются методы, основанные на разделении переменных. Однако эти подходы эффективны для ограниченного класса задач.

Методы решения и результаты расчетов трехмерного распределения света в скалярном приближении для линзы приведены в классической работе [88]. Эти исследования позволили выявить тонкую структуру распределения интенсивности в окрестности фокальной плоскости. Аналогичные результаты имеются для фокусировки Гауссовых пучков.

Существует ряд работ, посвященных расчету дифракции на ДОЭ аналитическими методами: [90-91]. Эти методы в основном базируются на методе Кирхгофа (приближении Кирхгофа) и дальнейшем вычислении полученных интегралов приближенными аналитическими методами. Они позволяют найти зависимость характеристик поля, таких как ширина фокальной линии, интенсивность на фокальной кривой и т.д. Эти методы используются в основном для расчета поля от ДОЭ, обладающих гладкой фазовой функцией, в рамках скалярной теории. Однако на практике ДОЭ имеют конечное число градаций фазы. Для того чтобы исследовать зависимость характеристик поля от числа уровней квантования, был разработан метод нелинейного предсказания [37]. Этот метод применяется в рамках приближения тонкого оптического элемента, которое, в свою очередь, базируется на лучевом приближении для поля внутри ДОЭ. Приближение тонкого оптического элемента становится неприменимым в случае, когда ДОЭ представляет собой решетку с периодом, сравнимым с длиной волны. Нарушение применимости приближения тонкого элемента ведет за собой нарушение условий, при которых можно использовать приближение скалярной оптики.

3. Численные методы моделирования

В литературе принята следующая классификация методов расчета:

- интегральные методы (Релея-Зоммерфельда, Кирхгофа, Кирхгофа-Котлера)
- дифференциальные,
- разностные,
- вариационные,
- дискретных источников,
- метод Т матрицы,
- метод множественных мультиполей,
- метод объемных интегральных уравнений.

Популярность интегральных методов основана на их возможности находить поле в пространстве, зная распределение тангенциальных компонент поля на некоторой поверхности. Существует несколько модификаций методов, основанных на этом принципе, например, метод Кирхгофа, интегральные представления Релея-Зоммерфельда [92] (для скалярных и векторных полей), формулы Стреттона-Чу, метод Кирхгофа-Котлера [93-108].

Метод Кирхгофа основан на решении скалярного уравнения Гельмгольца методом функций Грина, получении интегрального представления и последующим численным вычислением полученных интегралов. Для решения задачи этим методом следует выделить три области.

Первая область - это область до оптического элемента.

Поле в этой области полагается равным полю в отсутствие ДОЭ.

Вторая область - это область внутри ДОЭ.

В этой области задача распространения света решается в приближении геометрической оптики (лучевой метод). В результате применения лучевого метода находится поле на выходе ДОЭ.

И, наконец, третья область - это область за ДОЭ.

Поле в этой области находится непосредственно с помощью вычисления интеграла

Кирхгофа [92-94] или Релея-Зоммерфельда [92]. Задача сводится к вычислению двумерного интеграла по плоскости, непосредственно прилегающей к ДОЭ.

Для дальнейшего повышения точности расчета необходимо вместо интегральных представлений решения уравнения Гельмгольца, использовать соответствующие представления решений уравнений Максвелла. В этом случае для описания распространения света внутри ДОЭ необходимо использовать векторную геометрическую оптику.

Метод Стреттона-Чу [95] основан на использовании векторных формул Грина для векторного уравнения Гельмгольца. Метод Кирхгофа-Котлера [93] основан на формулах Стреттона-Чу, но имеет некоторые особенности. Дело в том, что мы не можем произвольно задавать значения электрического и магнитного полей на некоторой поверхности. Если мы будем поступать таким образом, то можем получить решение, которое не удовлетворяет системе уравнений Максвелла. Это наблюдается, например, если заданное распределение тангенциальных компонент описывается разрывной функцией. Разрывность функции обеспечивается протеканием тока на границе области линейного тока. Учет влияния этого тока приводит к формулам Кирхгофа-Котлера, отличным от формул Стреттона-Чу.

Интегральные представления решения уравнений Максвелла для анизотропных сред, а также решений в виде поверхностных электромагнитных волн рассмотрены в работах [97-100].

Наиболее просто интегральные методы расчета (Кирхгофа, Релея-Зоммерфельда) реализуются в рамках скалярной теории для радиально-симметричных элементов и элементами с фазовой функцией, представленной в виде суммы двух функций с разделяющимися переменными. Этому посвящено много работ.

Поле от ДОЭ с повышенной глубиной фокуса (фокусатор в отрезок на оптической оси) было впервые исследовано в работах [24-26]. В статьях [26, 29] исследуется фокусировка в кольцо с помощью оптического элемента с бинарной фазовой структурой, который является дополнением к линзе. Результаты, полученные методом вычислительного эксперимента, совпадают с результатами, полученными аналитическими методами в статье [23]. В работе [109] предложено несколько видов функций комплексного пропускания, описывающих оптический элемент с кольцевым импульсным откликом, получены интегральные представления для интенсивности светового поля в фокальной плоскости вблизи кольца. В дальнейшем было предложено несколько вариантов расчета для исследования полей, формируемых радиально-симметричными ДОЭ [30, 32-33, 41, 43-47].

В работах [23-26, 30, 32-33, 41, 43-47, 101-108] был проведен анализ дифракции когерентного излучения на различных ДОЭ, в том числе ДОЭ с квантованной фазовой функцией, были разработаны методы решения задач дифракции при освещении ДОЭ некогерентным излучением [60, 110]. Для случая освещения некогерентным излучением разработано множество методов решения обратных задач [60-70]. Эти работы включают не только методы, относящиеся к расчету ДОЭ, но и оптических элементов со свободной формой поверхности.

Дифракция на апертурах различной формы и простейших ДОЭ в рамках электромагнитной теории рассмотрена в работах [111-133].

Результаты расчетов пространственного распределения поля от короткофокусных элементов, полученные в приближении геометрической оптики внутри ДОЭ, отличаются от результатов, полученных в рамках строгой электромагнитной теории. В этой связи методы расчета, основанные на лучевом приближении (а также скалярной теории дифракции), становятся неадекватными, что приводит к постановке задачи решения уравнений Максвелла в векторной форме. Это обуславливает актуальность расчета дифракции когерентного оптического излучения на ДОЭ в рамках строгой электромагнитной теории с учетом влияния толщины оптического элемента и дифракции «в теле» ДОЭ. В настоящее время наблюдаются тенденции к миниатюризации ДОЭ и интеграции их с другими оптическими и электронными компонентами различных устройств. Это также приводит к необходимости более детального описания дифракции оптического излучения на ДОЭ.

Различные численные методы решения уравнений Максвелла дают возможность анализа дифракции оптического излучения на ДОЭ. Разностный метод решения уравнений Максвелла,

сформулированный Тафлое, Ли и Беренгером (A. Taflove, K.S. Yee, J.-P. Berenger) [111-113] был впервые применен для анализа дифракции на ДОЭ в работах американского профессора Празера (D.W. Prather) и коллективом научной школы академика РАН В.А. Сойфера [114-123]. Достоинством этого метода является универсальность, а недостатком - вычислительная сложность. Недостатком этих методов также является необходимость искусственно ограничивать область, в которой рассчитывается поле. На границе выделенной области необходимо задавать искусственные граничные условия типа абсолютно поглощающих стенок Берингера [112], т.е. ограничивать область поглощающей средой с тензорными диэлектрической и магнитной проницаемостями. Это, в свою очередь, приводит к увеличению размерности задачи.

В отличие от разностных методов решения уравнений Максвелла, интегральные и вариационные методы не требуют конструирования сложных поглощающих граничных условий. Например, вариационный метод, метод конечных элементов и метод Галеркина использовались в работах [124-125] для решения двумерных задач дифракционной оптики.

Вариационные методы в задачах с ограниченным объемом определяют решения уравнений Гельмгольца путем минимизации функционального соотношения. В работе [124] уравнение Гельмгольца решается с помощью метода конечных элементов Галеркина с использованием граничных условий сложного вида, что потребовало применения границы определенной формы. Его формулировка проста и может быть применена к произвольной неоднородной среде, однако он не включает в себя условия излучения Зоммерфельда.

В работе [125] представлен гибридный метод на основе метода конечных элементов, сформулированного через метод Ритца, и метода граничных элементов. В данном случае метод конечных элементов применяется для решения уравнения Гельмгольца во внутренней области неоднородного оптического элемента. Далее применяется интегральный метод и метод граничных элементов к области, внешней по отношению к оптическому элементу, где должны выполняться условия излучения. Решения, полученные для двух областей, сшиваются на границе оптического элемента. При этом должны выполняться условия непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного полей. Использование метода конечных элементов для определения поля внутри ДОЭ приводит к решению системы уравнений с трехдиагональной матрицей. Решение системы линейных уравнений с трехдиагональной матрицей требует меньше вычислительных ресурсов, чем методы, основанные на вычислении объемных интегралов. Однако при использовании этих методов для решения векторных задач дифракции в трехмерном случае возникают трудности, связанные с увеличением размерности получаемых систем линейных уравнений.

Метод Фурье-мод (Rigorous Coupled-Wave Analysis - RCWA), разработанный коллективом под руководством М. Мохарама (M.G. Moharam) [126-128], изначально применялся для расчета дифракции только на периодических структурах. В работах научной школы В.А. Сойфера [129-149] этот метод адаптирован для исследования дифракции на непериодических ДОЭ. В качестве базиса для представления электромагнитного поля в RCWA используются Фурье-моды, соответствующие плоским волнам вне структуры. Данный базис не всегда является наилучшим, например, при описании дифракции на радиально-симметричных структурах. Классические методы RCWA имеют много недостатков, в особенности в задачах дифракции ТМ-поляризованной волны на металлических решетках. Однако в последнее время появились алгоритмы, лишенные недостатков. Это позволяет использовать метод связанных волн для решения многих практических задач дифракции на гетероструктурах, содержащих металлические и диэлектрические периодические структуры с тензорными диэлектрической и магнитной проницаемостями. В отличие от сеточных методов и методов, основанных на интегральных уравнениях, методы Фурье-мод обладают меньшей вычислительной сложностью. Это, в свою очередь, снижает требования к вычислительной мощности используемых компьютеров. Недостатками метода является невозможность адаптации к расчету ДОЭ, обладающим зонной структурой, позволяющей упростить решение задачи дифракции, по сравнению с общим случаем.

В настоящее время разработан ряд эффективных методов и численных подходов к решению уравнений Максвелла внутри и вблизи наноструктур, которые позволяют найти плазмонные резонансы и создать эффективные устройства нанофотоники [132-149].

4. Асимптотические методы

Асимптотические методы в оптике появились давно и прошли несколько стадий развития. Они обычно ассоциируются с приближением геометрической оптики, которое основано на замене решения волнового уравнения на решение уравнений эйконала и переноса. Эти уравнения были получены У. Р. Гамильтоном, доказавшим в 1834, что общее уравнение механики (уравнение Гамильтона - Якоби) по форме подобно оптическому уравнению эйконала. Асимптотические методы решения волновых уравнений были развиты в работах математиков В.П. Маслова и М.В. Федорюка [150-151]. Работы этих авторов были посвящены вычислению быстро осциллирующих интегралов методами стационарной фазы и перевала, тесно связанных с приближением геометрической оптики. Обычно в оптике указанные методы использовались для вычисления интеграла Релея-Зоммерфельда, который в свою очередь является интегральным представлением решения уравнения Максвелла в однородной среде. Метод, основанный на решении уравнений эйконала и переноса [151], впоследствии был распространен на решение задач дифракции вблизи неособых точек каустических поверхностей Бабичем В.М. и Булдыревым В.С [152]. Набор асимптотических методов, используемых в оптике, ограничивается этим списком. Сфера применения указанных методов существенно ограничена. Все они применимы для расчета дифракции в среде с медленно изменяющимся показателем преломления. Следует отметить, что все приведенные асимптотические методы, используемые для решения задач дифракции в оптике, были разработаны без учета специфики дифракции когерентного излучения на ДОЭ. Типичным представителем ДОЭ является зонная пластинка Френеля. ДОЭ можно также представить в виде набора дифракционных решеток с различным периодом и ориентацией штрихов, изменяющимся от точки к точке. Подход, основанный на локальной аппроксимации ДОЭ дифракционной решеткой, впервые предложен в работах Грейсуха Г.И., Ефименко И.М., Степанова С.А. [153]. Эти авторы предложили в рамках метода трассировки лучей рассчитывать направление и интенсивность лучей, прошедших через дифракционную решетку. В этом случае луч, падающий на элемент, расщепляется на несколько лучей. Интенсивность каждого из лучей вычисляется из строгой теории дифракции на одномерной дифракционной решетке. Однако строгого обоснования данного метода в работах указанных авторов нет.

Асимптотические методы в оптике играют исключительную роль при анализе волновых полей. Они обеспечивают хорошее качественное описание чрезвычайно широкого класса различных физических явлений. В оптике асимптотические методы можно разделить на несколько основных групп:

- основанные на лучевом методе;
- асимптотические методы для поиска собственных значений и функций;
- основанные на методе стационарной фазы и методе перевала;
- основанные на теории возмущений.

Построение асимптотических разложений с помощью лучевого метода [151-152] возможно только при соблюдении некоторых условий:

- якобиан перехода от декартовых координат x, y, z к лучевым координатам u, v, t отличен от нуля;
- свойства среды меняются на расстоянии, сравнимом с длиной волны;
- освещающая волна имеет гладкий волновой фронт.

Если семейство лучей имеет огибающую линию, то якобиан преобразования становится равным нулю, и поэтому лучевой метод неприменим. В физике огибающую поверхность семейства лучей называют каустикой. Для волнового поля в окрестности каустики, не имеющей особых точек, удастся получить асимптотическое разложение, содержащее функции Эйри [154]. Лучевой метод, дополненный некоторыми результатами, позволяет также находить

асимптотические формулы для собственных функций и собственных значений краевых задач, связанных с уравнением Гельмгольца. Простота и наглядность лучевого метода делают его незаменимым инструментом для расчета коротковолновых полей. Касаясь методов решения прямой задачи вычисления поля, нельзя обойти вниманием геометрическую теорию дифракции [155]. Этот подход посвящен получению коротковолновых асимптотических разложений для полей, однако все эти методы работоспособны вдали от каустических линий и фокальных точек. Подробное описание методов расчета поля вблизи каустических поверхностей приведено в [151,154]. В основном лучевой метод используется для расчета полей, созданных в результате прохождения света через различные преломляющие поверхности или в результате отражения от поверхностей сложной формы.

Лучевой метод, дополненный некоторыми результатами, позволяет находить асимптотические формулы для получения собственных функций и соответствующих собственных значений краевых задач, связанных с уравнением Гельмгольца. Лучевые представления для получения асимптотических собственных значений оператора Лапласа применены в работе Келлера и Рубинау [156-157]. Метод основан на предположении существования инвариантных относительно отражений конгруэнций лучей. Такие конгруэнции удалось найти в плоском случае для круга, сферы, эллипса, трехосного эллипсоида. К сожалению, метод Келлера-Рубинау в своем первоначальном изложении имеет очень ограниченную область применимости. Попытки использовать этот метод в более общих случаях наталкиваются на принципиальные трудности, связанные с существованием зон неустойчивости решений.

Собственные функции, сосредоточенные в окрестности границы двумерной области, получили название собственных функций шепчущей галереи. Собственные функции, сосредоточенные в окрестности луча, инвариантного по отношению к отражениям, получили название собственных функций прыгающего мячика.

Оказывается, что асимптотика собственных функций шепчущей галереи и прыгающего мячика может быть получена с помощью метода, который представляет собой видоизменение метода Келлера-Рубинау.

Построение асимптотических разложений привело к созданию так называемого метода эталонных задач. Метод эталонных задач представляет собой обобщение на краевые задачи теории дифракции метода эталонных уравнений, который в настоящее время широко используется для получения асимптотических решений обыкновенных дифференциальных уравнений [150-154]. В основе этого метода лежит утверждение: сходная геометрия лучей приводит к сходным асимптотическим формулам. Таким образом, если эталонное уравнение в асимптотической теории дифференциальных уравнений - это простейшее уравнение с теми же особенностями коэффициентов, что и у исходного уравнения, то эталонная задача в теории дифракции - это простейшая задача, в которой поле лучей обладает теми же особенностями, что и исходная задача. Схема метода эталонных задач состоит в следующем. Рассматриваемая исходная задача заменяется простейшей эталонной задачей, допускающей точное решение обычно с помощью метода разделения переменных. Точное решение исследуется в коротковолновом случае, и из него выделяется выражение, которое асимптотически описывает волновое поле в интересующей нас области, где поле лучей обладает специфическими для нас особенностями. Обычно это выражение представляет собой произведение специальных функций или контурный интеграл от специальных функций. Волновое поле в исходной задаче ищется в аналогичном виде, но с другими коэффициентами асимптотических рядов. Иными словами, найденное при исследовании эталонной задачи аналитическое выражение для волнового поля переносится на исходную задачу. Коэффициенты асимптотических рядов последовательно определяются при подстановке этого выражения в уравнение Гельмгольца и граничные условия исходной задачи. Чем больше найдено членов в асимптотических рядах, тем быстрее должна стремиться к нулю невязка в уравнении Гельмгольца и граничных условиях с ростом частоты освещающего пучка.

Методы, основанные на методе стационарной фазы и перевала [150-151], тесно связаны с интегральными методами, основанными на вычислении интеграла Кирхгофа [88,92-93],

интеграла Релея-Зоммерфельда [92], формул Стретона-Чу [95], интеграла Кирхгофа-Котлера [93]. В этом случае интегралы вычисляются методом стационарной фазы или перевала. Они представляют собой разновидности метода эталонных задач для вычисления быстро осциллирующих интегралов. Суть состоит в замене подынтегральной функции на эталонную, от которой интеграл берется аналитически. Комплексная подынтегральная функция представляется в виде произведения модуля и экспоненты от фазы. Фаза разлагается в ряд Тейлора с точностью до членов второго порядка в стационарной точке, где производная равна нулю. Функция модуля заменяется ее значением в стационарной точке. Полученные интегралы легко берутся аналитическими методами.

Лучевой метод, а также метод стационарной фазы, можно использовать для расчета полей, создаваемых ДОО. Применение этих методов возможно при выполнении следующих условий:

- ДОО освещается волной с гладким волновым фронтом;
- точки пространства, в которых рассчитывается поле, находятся вдали от каустических поверхностей;
- поле на выходе ДОО описывается функцией с дважды дифференцируемой фазой.

Первое условие выполнимо практически всегда. Применимость второго условия обсуждалась выше. Третье условие нарушается в случае, когда оптический элемент рассчитывается с помощью итерационных алгоритмов типа Герчберга-Секстона, а также в случае ДОО с квантованными значениями фазы.

Методы, основанные на теории возмущений, можно подразделить на три класса:

- методы возмущения для уравнения эйконала в рамках лучевого метода;
- методы возмущения для нахождения траекторий в рамках лучевого метода;
- методы теории возмущения для нахождения поправок к собственным значениям.

Первые два используются в рамках приближения геометрической оптики. Третий - при решении задачи дифракции на периодической структуре в рамках метода связанных волн. Этот метод подразумевает решение системы линейных дифференциальных уравнений. Оно в свою очередь требует приведения матрицы к диагональному виду и поиск собственных значений.

В данном случае можно значительно упростить процедуру поиска собственных значений матрицы, если известны собственные значения и векторы матрицы со слабо отличающимися матричными элементами.

Резюмируя, подчеркнем, что во всех перечисленных работах:

1. Существующие интегральные методы вычисления полей, сформированные ДОО, основанные на интегралах Кирхгофа и Релея-Зоммерфельда, не позволяют учитывать распространение света внутри ДОО в рамках строгой теории. Поле внутри и на выходе ДОО рассчитываются в приближении геометрической оптики. Приближение геометрической оптики можно использовать только в случае, если размер зоны на ДОО намного больше длины волны освещающего пучка. В случае короткофокусных элементов, которые используются для острой фокусировки, размер зоны сравним с длиной волны и приближение геометрической оптики несправедливо.

2. Интегральные методы, основанные на вычислении интеграла Релея-Зоммерфельда, применимы только для расчета поля в однородной среде. Их нельзя применить, даже если на пути находится многослойное покрытие или дифракционная решетка.

3. Методы Фурье-мод, разработанные для расчета полей от дифракционных решеток, трудно применить к решению задач, обладающих радиальной симметрией. Это связано с тем, что периодические структуры сложно описать в любой системе координат, кроме декартовой. Для решения задач требуется брать много членов разложения, и это, в свою очередь, требует больших вычислительных мощностей.

Методы, свободные от указанных недостатков разработаны в научной школе академика РАН В.А. Сойфера [158-169]. В работах [158-169] предложены асимптотические методы решения системы уравнений Максвелла для дифракции когерентного электромагнитного излучения на оптических элементах, обладающих зонной структурой. Простейшим элементом, обладающим зонной структурой, является обычная зонная пластинка Френеля. Метод основан на локальном представлении элемента в виде дифракционной решетки. В этих работах найдены

представления для полей, позволяющие свести задачу к дифракции на локальной дифракционной решетке. Это позволяет значительно снизить вычислительную сложность решения задач дифракции на оптических элементах с апертурой несколько тысяч длин волн.

5. Методы формирования микрорельефов и применения фокусаторов

С появления первых фокусаторов их создатели уделяли пристальное внимание методам экспериментального подтверждения их работоспособности и потенциальным практическим приложениям. Для изготовления первых ДОО использовался метод дублирования бихромированной желатины [9-10, 170] с последующим гальваническим наращиванием медного микрорельефа для отражающих фокусаторов. Для более точного воспроизведения рассчитанной формы микрорельефа в дальнейшем были развиты методы литографии [171-172], в том числе электронной [173-174], аддитивная технология послойного наращивания фоторезиста [175], методы резания микрорельефа на станках с ЧПУ [176], ионного, плазмохимического и лазерного формирования микрорельефов [177-186]. Эти методы позволили экспериментально доказать [171-173, 184-186] эффективность разработанных методов расчета и подготовить оптические элементы для практического использования.

Оптические элементы с повышенной глубиной фокуса актуальны для использования в лазерных проигрывателях компакт-дисков, для получения оптического разряда в газе, лазерных технологических установках, для ввода излучения в оптическое волокно, создания опорной световой линии в метрологии и т.п. Фокусаторы создавались в первую очередь и до сих пор активно используются для лазерной обработки материалов [187-192]: закалка, наплавка, сублимация, сварка, формирование нанопор и т.п. В то же время фокусаторы также используются в оптическом приборостроении, например, в установке «Пьедестал» с целью выращивания кристаллов для волоконных лазеров [193-194], в устройствах контроля дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов [195-196] и в медицине для коррекции формы и рефракции роговицы глаза [197-198].

6. Заключение

Фокусаторы стали самым первым примером синергетических возможностей квантовой электроники, информационных и микроэлектронных технологий, положив начало формированию нового научного направления, и до сих пор являются атрибутом и ярчайшим символом компьютерной оптики. Я получал огромное удовольствие, работая над созданием фокусаторов под руководством д.ф.-м.н. Иосифа Норайровича Сисакяна, взаимодействуя с учеными из группы д.т.н. Виктора Александровича Сойфера и наблюдая за их успехами.

7. Благодарности

Обзор подготовлен в рамках работ по гранту РФФИ № 19-29-11026.

8. Литература

- [1] Gerchberg, R.W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures / R.W.Gerchberg, W.D. Saxton // *Optik*. – 1972. – Vol. 35. – P. 237-246.
- [2] Fienup, J.R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform // *J.R. Fienup / Opt. Lett.* – 1973. – Vol. 3, № 1. – P. 27-29.
- [3] Fienup, J.R. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms / *J.R. Fienup // Optical Engineering*. – 1980. – Vol. 19, № 3. – P. 297-305.
- [4] Fienup, J.R. Phase retrieval algorithm: a comparison / *J.R. Fienup // Appl. Opt.* – 1982. – Vol. 21, № 15. – P. 2758-2769.
- [5] Bryngdahl, O. Laser beam scanning using computer generated holograms / *O. Bryngdahl, W.H. Lee // Applied Optics*. – 1976. – Vol. 15, № 1. – P. 183-194.
- [6] Гинзбург, В.М. Голография. Методы и аппаратура / В.М. Гинзбург, Б.М. Степанов – М.: Советское радио, 1974. – 376 с.

- [7] Ярославский, Л.П. Методы цифровой голографии / Л.П. Ярославский, Н.С. Мерзляков – М.: Наука, 1977. – 192 с.
- [8] Сойфер, В.А. Цифровая голография и ее применение / В.А. Сойфер – Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1978. – 86 с.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Голуб, М.А. Машинный синтез фокусирующих элементов для CO₂-лазера / М.А. Голуб, В.П. Дегтярева, А.Н. Климов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8, № 13. – С. 449-451.
- [12] Golub, M.A. Synthesis of spatial filters for investigation of the transverse mode composition of coherent radiation / M.A. Golub, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Soviet Journal of Quantum Electronics. – 1982. – Vol. 12(9). – P. 1208-1209.
- [13] Прохоров, А.М. Способ фокусировки монохроматического излучения и устройство для его осуществления / А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, М.А. Голуб, В.А. Сойфер, С.В. Карпеев // Авторское свидетельство SU 1302233 A1, 07.04.1987. Заявка № 3408156 от 09.03.1982.
- [14] Данилов, В.А. Синтез оптических элементов, создающих фокальную линию произвольной формы / В.А. Данилов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, Д.М. Сагателян, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8, № 13. – С. 810-815.
- [15] Гончарский, А.В. Решение обратной задачи фокусировки лазерного излучения в произвольную кривую / А.В. Гончарский, В.А. Данилов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, В.В. Степанов // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 273, № 3. – С. 605-608.
- [16] Березный, А.Е. Бессель-оптика / А.Е. Березный, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 274, № 4. – С. 802-804.
- [17] Гончарский, А.В. Фокусаторы лазерного излучения, падающего под углом / А.В. Гончарский, В.А. Данилов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, В.В. Степанов // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11, № 1. – С. 166-168.
- [18] Гончарский, А.В. Устройство для фокусировки оптического излучения в отрезок прямой (его варианты) / А.В. Гончарский, В.А. Данилов, В.В. Попов, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, В.В. Степанов // Авторское свидетельство SU 1303960 A1, 15.04.1987. Заявка № 3773603 от 19.07.1984.
- [19] Гончарский, А.В. Устройство для фокусировки оптического излучения в кривую линию (его варианты) / А.В. Гончарский, В.А. Данилов, В.В. Попов, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, В.В. Степанов // Авторское свидетельство SU 1303961 A1, 15.04.1987. Заявка № 3790098 от 26.09.1984.
- [20] Гончарский, А.В. Устройство для фокусировки оптического излучения в прямоугольник с равномерным распределением интенсивности (его варианты) / А.В. Гончарский, В.А. Данилов, В.В. Попов, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, В.В. Степанов // Авторское свидетельство SU 1314291 A1, 30.05.1987. Заявка № 3790097 от 26.09.1984.
- [21] Гончарский, А.В. Плоские фокусирующие элементы видимого диапазона / А.В. Гончарский, В.А. Данилов, В.В. Попов, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, В.В. Степанов // Квантовая электроника. – 1986. – Т. 13, № 3. – С. 660-662.
- [22] Данилов, В.А. Теория когерентных фокусаторов / В.А. Данилов, Б.Е. Кинбер, А.Е. Шилов // Компьютерная оптика. – 1987. – № 1. – С. 40-52.
- [23] 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. – № 6. – С. 8-15.

- [24] Казанский, Н.Л. Процедура корректировки фазовой функции фокусатора по результатам вычислительного эксперимента / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 1987. – № 1. – С. 90-96.
- [25] Соيفер, В.А. К расчету фокусатора в соосный отрезок / В.А. Соифер // Оптическая запись и обработка информации – Куйбышев: КуАИ, 1988. – С. 45-52.
- [26] Голуб, М.А. Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер // Автометрия. – 1988. – № 1. – С. 70-82.
- [27] Sisakyan, I.N. Infrared focusators, new optical elements / I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // Infrared Physics. – 1991. – Vol. 32. – P. 435-438.
- [28] 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.
- [29] Казанский, Н.Л. Исследование дифракционных характеристик фокусатора в кольцо методом вычислительного эксперимента / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 1992. – № 10-11. – С. 128-144.
- [30] 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.
- [31] Голуб, М.А. Устройство для фокусировки монохроматического излучения / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, С.И. Харитонов // Патент на изобретение RU 2024897 C1, 15.12.1994. Заявка № 4927509/10 от 17.04.1991.
- [32] Khonina, S.N. Calculation of the focusators into a longitudinal line-segment and study of a focal area / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1993. – Vol. 40. – P. 761-769.
- [33] 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.
- [34] Данилов, В.А. Фокусаторы в отрезок, составляющий произвольный угол с оптической осью / В.А. Данилов, К.А. Кулькин, И.Н. Сисакян // Компьютерная оптика. – 1992. – № 10-11. – С. 48-68.
- [35] Гончарский, А.В. О существовании гладких решений в задачах фокусировки электромагнитного излучения / А.В. Гончарский, В.В. Степанов // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 279, № 4. – С. 788-792.
- [36] 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.
- [37] Досколович, Л.Л. Нелинейное предсказание фазы для фокусировки в систему фокальных линий / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Соифер, С.И. Харитонов // Научное приборостроение. – 1993. – Т. 3, № 1. – С. 24-37.
- [38] Голуб, М.А. Фокусировка лазерного излучения в прямолинейно-скругленные контура / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1992. – № 12. – С. 3-8.
- [39] Данилов, В.А. Фокусаторы в фигуры, составленные из пространственных кривых / В.А. Данилов, К.А. Кулькин, И.Н. Сисакян // Компьютерная оптика. – 1993. – № 13. – С. 3-11.
- [40] Doskolovich, L.L. Design of DOEs for wavelength division and focusing / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, P. Perlo, P. Repetto // Journal of Modern Optics. – 2005. – Vol. 52(6). – P. 917-926. DOI: 10.1080/09500340512331313953.
- [41] Голуб, М.А. Исследование фокусаторов в прямоугольник методом вычислительного эксперимента / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Соифер, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1992. – № 10-11. – С. 110-122.
- [42] Досколович, Л.Л. Фокусировка лазерного излучения на трехмерную поверхность вращения / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1992. – № 12. – С. 8-14.
- [43] Голуб, М.А. Оценка дифракционного размытия фокальной линии геометрооптических фокусаторов / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, С.И. Харитонов //

- Компьютерная оптика. – 1989. – № 5. – С. 34-38.
- [44] Голуб, М.А. Дифракционный расчет интенсивности поля вблизи фокальной линии фокусатора / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соيفер, С.И. Харитонов // Оптика и спектроскопия. – 1989. – Т. 67, № 6. – С. 1387-1389.
- [45] Голуб, М.А. Дифракционные поправки при фокусировке лазерного излучения в отрезок / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, С.И. Харитонов // Оптика и Спектроскопия. – 1992. – Т. 73, № 6. – С. 1069-1073.
- [46] Голуб, М.А. Дифракционный подход к синтезу многофункциональных фазовых элементов / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Соифер, С.И. Харитонов // Оптика и спектроскопия. – 1992. – Т. 73, № 1. – С. 191-195.
- [47] Голуб, М.А. Дифракционный расчет интенсивности светового поля вблизи фокальной линии / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Соифер, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1992. – № 10-11. – С. 122-127.
- [48] Golub, M.A. Focusators at letters diffraction design / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1991. – Vol. 1500. – P. 211-221.
- [49] Soifer, V.A. Synthesis of a binary DOE focusing into an arbitrary curve, using the electromagnetic approximation / V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – Vol. 29(4-5). – P. 237-247. DOI: 10.1016/s0143-8166(97)00112-7.
- [50] Досколович, Л.Л. Практический алгоритм расчета фокусаторов в линию с использованием криволинейных координат / Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1998. – № 18. – С. 37-39.
- [51] Дмитриев, А.Ю. Расчет дифракционного оптического элемента для фокусировки в линию в непараксиальном случае / А.Ю. Дмитриев, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 344-347.
- [52] Досколович, Л.Л. Дифракционный расчет фокусаторов в фокальные кривые. / Л.Л. Досколович, О.И. Петрова, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2002. – № 24. – С. 8-16.
- [53] Дмитриев, А.Ю. Асимптотический расчет светового поля от ДОО для фокусировки в линию / А.Ю. Дмитриев, Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 195-200.
- [54] Golub, M.A. Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39(6). – P. 1245-1251. DOI: 10.1080/713823549.
- [55] Doskolovich, L.L. Design and investigation of color separation diffraction gratings / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, N. Heikkila, S. Siitonen, J. Turunen // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46(15). – P. 2825-2830. DOI: 10.1364/AO.46.002825.
- [56] Досколович, Л.Л. Расчёт дифракционной линзы с фиксированным положением фокуса при нескольких заданных длинах волн / Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Д.А. Быков, Р.В. Скиданов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 946-955. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-946-955.
- [57] Doskolovich, L.L. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1996. – Vol. 43(7). – P. 1423-1433. DOI: 10.1080/09500349608232815.
- [58] Харитонов, С.И. Решение обратной задачи фокусировки лазерного излучения в плоские области в рамках геометрической оптики / С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 439-450. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-439-450.
- [59] 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.

- [60] Досколович, Л.Л. Проектирование светотехнических устройств с ДОО / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1998. – № 18. – С. 91-96.
- [61] Doskolovich, L.L. A DOE to form a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov, P. Perlo // Journal of Modern Optics. – 2004. – Vol. 51(13). – P. 1999-2005. DOI: 10.1080/09500340408232507.
- [62] Doskolovich, L.L. Designing reflectors to generate a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, P. Perlo, S. Bernard // Journal of Modern Optics. – 2005. – Vol. 52(11). – P. 1529-1536. DOI: 10.1080/09500340500058082.
- [63] Doskolovich, L.L. Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S. Bernard // Journal of Modern Optics. – 2007. – Vol. 54(4). – P. 589-597. DOI: 10.1080/0950034060102186.
- [64] Kazanskiy, N. Binary beam splitter / N. Kazanskiy, R. Skidanov // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51(14). – P. 2672-2677. DOI: 10.1364/AO.51.002672.
- [65] Doskolovich, L.L. Analytical design of refractive optical elements generating one-parameter intensity distributions / L.L. Doskolovich, A.Yu. Dmitriev, M.A. Moiseev, N.L. Kazanskiy // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31(11). – P. 2538-2544. DOI: 10.1364/JOSAA.31.002538.
- [66] Doskolovich, L.L. Design of mirrors for generating prescribed continuous illuminance distributions on the basis of the supporting quadric method / L.L. Doskolovich, K.V. Borisova, M.A. Moiseev, N.L. Kazanskiy // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55(4). – P. 687-695. DOI: 10.1364/AO.55.000687.
- [67] Doskolovich, L.L. Analytical source-target mapping method for the design of freeform mirrors generating prescribed 2D intensity distributions / L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, M.A. Moiseev, D.A. Bykov, N.L. Kazanskiy // Optics Express. – 2016. – Vol. 24(10). – P. 10962-10971. DOI: 10.1364/OE.24.010962.
- [68] Bykov, D.A. Linear assignment problem in the design of freeform refractive optical elements generating prescribed irradiance distributions / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, A.A. Mingazov, E.S. Andreev, N.L. Kazanskiy // Optics Express. – 2018. – Vol. 26(21). – P. 27812-27825. DOI: 10.1364/OE.26.027812.
- [69] Doskolovich, L.L. Design of an axisymmetrical refractive optical element generating required illuminance distribution and wavefront / L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, K.V. Andreeva, N.L. Kazanskiy // Journal of the Optical Society of America A. – 2018. – Vol. 35(11). – P. 1949-1953. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001949.
- [70] Мингазов, А.А. Задача двух рефлекторов, формирующих световой пучок с плоским волновым фронтом из точечного источника, как задача перемещения масс / А.А. Мингазов, Л.Л. Досколович, Д.А. Быков, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 968-975. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-968-975.
- [71] Doskolovich L.L. Calculation of quantized DOE's based on continuous series approach / L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov, P. Perlo, P. Repetto, O.I. Petrova, V.A. Soifer // Proceedings SPIE. – 1998. – Vol. 3348. – P. 37-48.
- [72] Doskolovich, L.L. Direct two-dimensional calculation of binary DOEs using a non-binary series expression approach / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, P. Perlo, P. Repetto, V.A. Soifer // International Journal of Optoelectronics. – 1996. – Vol. 10, № 4. – P. 243-249.
- [73] Soifer, V.A. Multifocal and combined diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, P. Perlo // Proceedings of SPIE. – 1993. – Vol. 1992. – P. 226-234.
- [74] Soifer, V.A. Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33, № 11. – P. 3610-3615. DOI: 10.1117/12.179890.
- [75] Воронцов, М.А. Принципы адаптивной оптики / М.А. Воронцов, В.И. Шмальгаузен – М.: Наука, 1985. – 335 с.
- [76] Воронцов, М.А. Оптимальное управление волновым фронтом в задачах фокусировки излучения в произвольную область / М.А. Воронцов, А.Н. Матеев, В.П. Сивоконь // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 270, № 6. – С. 1354-1358.

- [77] Воронцов, М.А. К расчету фокусаторов лазерного излучения в дифракционном приближении / М.А. Воронцов, А.Н. Матеев, В.П. Сивоконь // Компьютерная оптика. – 1987. – №1. – С. 74-79.
- [78] Turunen, J. Kinoform phase relief synthesis / J. Turunen, A. Vasara // Optical Engineering. – 1989. – Vol. 28(11). – P. 1162-1167.
- [79] Turunen, J. Stripe-geometry for two-dimensional Dammann gratings / J. Turunen, A. Vasara, J. Westerholm // Opt. Commun. – 1990. – Vol. 74. – P. 245-252.
- [80] Khonina, S.N. Fast Hankel transform for focusators synthesis / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // Optik. – 1991. – Vol. 88(4). – P. 182-184.
- [81] Kotlyar, V.V. Adaptive iterative algorithm for focusators synthesis / V.V. Kotlyar, I.V. Nikolsky, V.A. Soifer // Optik. – 1991. – Vol. 88(1). – P. 17-19.
- [82] Kazanskiy, N.L. Computer-aided design of diffractive optical elements / N.L. Kazanskiy, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33(10). – P. 3156-3166. DOI: 10.1117/12.178898.
- [83] Kotlyar, V.V. Iterative calculation of diffractive optical elements focusing into a three dimensional domain and the surface of the body of rotation / V.V. Kotlyar, S.V. Khonina, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1996. – Vol. 43(7). – P. 1509-1524.
- [84] 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.
- [85] Doskolovich, L.L. A gradient method for design of varied - depth binary diffraction grating / L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov, O.I. Petrova, V.A. Soifer // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – Vol. 29(5). – P. 249-259.
- [86] Doskolovich, L.L. Design of multiorde diffraction grating using the Rayleigh method / L.L. Doskolovich, S.I. Kharitonov, O.I. Petrova, V.A. Soifer // Proceedings SPIE. – 1998. – Vol. 3348. – P. 13-21.
- [87] Волков, А.В. Методы компьютерной оптики / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, В.С. Соловьев, Г.В. Успенев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина – М.: Физматлит, 2000. – 688 с.
- [88] Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф – М.: Наука, 1973. – 720 с.
- [89] Ваганов, Р.Б. Основы теории дифракции / Р.Б. Ваганов, Б.З. Каценеленбаум – М.: Наука, 1982. – 272 с.
- [90] Kazanskiy, N.L. A calculation of the field formed by a focusator illuminated by Gaussian-Hermite beams / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1995. – Vol. 2363. – P. 285-289.
- [91] Kazanskiy, N.L. Application of a pseudogeometrical optical approach for calculation of the field formed by a focusator / N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Optics & Laser Technology. – 1996. – Vol. 28(4). – P. 297-300. DOI: 10.1016/0030-3992(95)00103-4.
- [92] Зоммерфельд, А. Оптика / А. Зоммерфельд – М.: Иностранная литература, 1953. – 486 с.
- [93] Виноградова, М.В. Теория волн / М.В. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков – М.: Наука, 1979. – 306 с.
- [94] Colton, D. Integral equation methods in scattering theory / D. Colton, R. Kress – New York: John Wiley & Sons, 1983. – 308 p.
- [95] Ильинский, А.С. Математические модели электродинамики / А.С. Ильинский, В.В. Кравцов, А. Г. Свешников – М.: Высшая школа, 1991. – 223 с.
- [96] Казанский, Н.Л. Компактная запись решений системы уравнений Максвелла в пространственно-частотном представлении / Н.Л. Казанский, М.Л. Каляев, С.И. Харитонов // Антенны. – 2007. – № 10. – С. 13-21.
- [97] Досколович, Л.Л. Интегральные представления решений системы уравнений Максвелла для анизотропных сред / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 52-57.

- [98] Досколович, Л.Л. Интегральные представления решений уравнений Максвелла в виде спектра поверхностных электромагнитных волн / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 151-154.
- [99] Волоотовский, С.Г. Методы теории рассеяния для решения задач дифракционной оптики / С.Г. Волоотовский, Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2001. – № 21. – С. 23-30.
- [100] Pullini, D. Rigorous computation and fabrication of 2D-subwavelength resonance structures for photonic applications / D. Pullini, S. Bernard, L. Doskolovich, N. Kazanskiy, P. Perlo, V. Soifer // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 187-190.
- [101] Хонина, С.Н. Линзакон: непараксиальные эффекты / С.Н. Хонина, Н.Л. Казанский, А.В. Устинов, С.Г. Волоотовский // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 11. – С. 44-51.
- [102] Khonina, S.N. Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // Journal of Modern Optics. – 2011. – Vol. 58(9). – P. 748-760. DOI:10.1080/09500340.2011.568710.
- [103] Khonina, S.N. Influence of vortex transmission phase function on intensity distribution in the focal area of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – Vol. 20(1). – P. 23-42. DOI: 10.3103/S1060992X11010024.
- [104] Казанский, Н.Л. Анализ эффектов непараксиальности в линзаконных оптических системах / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 5. – С. 78-89. DOI: 10.15372/AUT20170508.
- [105] Казанский, Н.Л. Вычислительный эксперимент с линзой Френеля / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 1988. – № 3. – С. 22-28.
- [106] Голуб, М.А. Вычислительный эксперимент с фокусатором Гауссова пучка в прямоугольнике с постоянной интенсивностью / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1990. – № 7. – С. 42-49.
- [107] Golub, M.A. Computational experiment for computer generated optical elements / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, N.G. Orlova, I.N. Sisakian, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1991. – Vol. 1500. – P. 194-206.
- [108] Doskolovich, L.L. Diffraction investigation of focusators into plane area / L.L. Doskolovich, M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Proceedings of SPIE. – 1993. – Vol. 1983(2). – P. 656-657.
- [109] Soifer, V.A. Diffractive micro-optical elements with non-point response / V.A. Soifer, M.A. Golub // Proceedings SPIE. – 1992. – Vol. 1751. – P. 140-154.
- [110] Казанский, Н.Л. Моделирование светотехнических устройств с ДОО / Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 1995. – Т. 14-15, № 2. – С. 107-116.
- [111] Taflove, A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method / A. Taflove, S. Hagness – Artech House Publishers – Boston, 2000. – 852 p.
- [112] Berenger, J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves / J.-P. Berenger // Journal of Computational Physics. – 1994. – Vol. 114. – P. 185-200.
- [113] Yee, K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media / K.S. Yee // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1966. – Vol. 14. – P. 302-307.
- [114] Головашкин, Д.Л. Моделирование волноводного распространения оптического излучения в рамках электромагнитной теории / Д.Л. Головашкин, А.А. Дегтярев, В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. – 1997. – № 17. – С. 5-9.
- [115] Prather, D.W. Boundary integral methods applied to the analysis of diffractive optical elements / D.W. Prather, M.S. Mirotznik, J.N. Mait // Journal of Optical Society of America. – 1997. – Vol. 14. – P. 34-43.
- [116] Prather, D.W. Formulation and application of the finite-difference time-domain method for the analysis of axially symmetric diffractive optical elements / D.W. Prather, S. Shi // Journal of Optical Society of America. – 1999. – Vol. 16(5). – P. 1131-1142.

- [117] Soifer, V.A. Methods for computer design of diffractive optical elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, V.S. Solovyev, G.V. Uspleneyev, A.V. Volkov – John Wiley & Sons, Inc. USA, 2002. – 765 p.
- [118] Головашкин, Д.Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла. Одномерный случай / Д.Л. Головашкин, Н.Л. Казанский // Автометрия. – 2006. – Т. 42, № 6. – С. 78-85.
- [119] Головашкин, Д.Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла. Двумерный случай / Д.Л. Головашкин, Н.Л. Казанский // Автометрия. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 78-88.
- [120] Golovashkin, D.L. Mesh domain decomposition in the finite-difference solution of Maxwell's equations / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2009. – Vol. 18(3). – P. 203-211. DOI: 10.3103/S1060992X09030102.
- [121] Golovashkin, D.L. Solving diffractive optics problem using graphics processing units / D.L. Golovashkin, N.L. Kazanskiy // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – Vol. 20(2). – P. 85-89. DOI: 10.3103/S1060992X11020019.
- [122] Воротникова, Д.Г. Параллельные алгоритмы решения сеточных уравнений / Д.Г. Воротникова, Д.Л. Головашкин, Н.Л. Казанский, А.В. Кочуров, Л.В. Логанова, С.А. Малышева – Самара: ИСОИ РАН, 2013. – 146 с.
- [123] Kazanskiy, N.L. Modeling diffractive optics elements and devices // Proc. SPIE. – 2018. – Vol. 10774. – P. 107740O. DOI: 10.1117/12.2319264.
- [124] Nesterenko, D.V. Modeling the light diffraction by microoptics elements using the finite element method / D.V. Nesterenko, V.V. Kotlyar // Proceedings of SPIE. – 2000. – Vol. 4002. – P. 135-142.
- [125] Kotlyar, V.V. Analysis of light diffraction by binary micro-optics using a combination of boundary element method and finite element method / V.V. Kotlyar, D.V. Nesterenko // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4242. – P. 125-132.
- [126] Moharam, M.G. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings / M.G. Moharam, T.K. Gaylord // Journal of Optical Society of America A. – 1982. – Vol. 72(10). – P. 1385-1392.
- [127] Moharam, M.G. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings / M.G. Moharam, E.B. Grann, D.A. Pommet, T.K. Gaylord // Journal of Optical Society of America A. – 1995. – Vol. 12(5). – P. 1068-1076.
- [128] Moharam, M.G. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam, D.A. Pommet, E.B. Grann, T.K. Gaylord // J. Opt. Soc. Am. A. – 1995. – Vol. 12(5). – P. 1077-1086.
- [129] Doskolovich, L.L. Software for designing and modeling the diffraction gratings in the rigorous electromagnetic theory / L.L. Doskolovich, E.A. Kadomina, I.I. Kadomin, S.I. Kharitonov // Optical Memory & Neural Networks. – 2007. – Vol. 16(1). – P. 24-30.
- [130] Досколович, Л.Л. Исследование бинарных линз в рамках электромагнитной теории. / Л.Л. Досколович, О.И. Петрова, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2003. – № 25. – С. 21-23.
- [131] Kazanskiy, N.L. Cloud computing for nanophotonic simulations / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // Lecture Notes in Computer Science. – 2013. – Vol. 7715. – P. 54-67. DOI: 10.1007/978-3-642-38250-5_7.
- [132] Безус, Е.А. Расчет дифракционных структур для фокусировки поверхностных электромагнитных волн / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Соيفер, С.И. Харитонов, М. Пицци, П. Перло // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 2. – С. 185-192.
- [133] Быков, Д.А. Экстраординарный магнитооптический эффект изменения фазы дифракционных порядков в диэлектрических дифракционных решетках / Д.А. Быков, Л.Л. Досколович, В.А. Соифер, Н.Л. Казанский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2010. – Т. 138, № 6(12). – С. 1093-1102.

- [134] 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(1). – P. 015001. DOI: 10.1088/2040-8978/12/1/015001.
- [135] Безус, Е.А. Расчет дифракционных оптических элементов для фокусировки плазмонных мод / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер // *Оптический журнал*. – 2010. – Т. 77, № 7. – С. 69-71.
- [136] Безус, Е.А. Подавление рассеяния в элементах плазмонной оптики с помощью двухслойной диэлектрической структуры / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер // *Письма в ЖТФ*. – 2011. – Т. 37, № 23. – С. 10-18.
- [137] 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.
- [138] Безус, Е.А. Плазмонный волновод диэлектрик–диэлектрик–металл для подавления паразитного рассеяния в элементах плазмонной оптики / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2011. – Т. 75, № 12. – С. 1674-1677.
- [139] Bezus, E.A. Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Microelectronic Engineering*. – 2011. – Vol. 88(2). – P. 170-174.
- [140] Bezus, E.A. Interference pattern formation in evanescent electromagnetic waves using waveguide diffraction gratings / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Quantum Electronics*. – 2011. – Vol. 41(8). – P. 759-764. DOI: 10.1070/QE2011v041n08ABEH014500.
- [141] 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.
- [142] Bezus, E.A. Low-scattering surface plasmon refraction with isotropic materials / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22(11). – P. 13547-13554. DOI: 10.1364/OE.22.013547.
- [143] Казанский, Н.Л. Моделирование гиперспектрометра на спектральных фильтрах с линейно-изменяющимися параметрами / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина, С.Г. Вологовский, Ю.С. Стрелков // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 256-270.
- [144] Kazanskiy, N.L. Coupled-resonator optical waveguides 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.
- [145] 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.
- [146] 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.
- [147] 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.
- [148] Kazanskiy, N.L. Plasmonic sensors based on Metal-insulator-metal waveguides for refractive index sensing applications: A brief review / N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, M.A. Butt // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. – 2020. – Vol. 117. – P. 113798. DOI: 10.1016/j.physe.2019.113798.
- [149] Butt, M.A. A plasmonic colour filter and refractive index sensor applications based on metal–insulator–metal square μ -ring cavities / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Laser Physics*. – 2020. – Vol. 30(1). – P. 016205. DOI: 10.1088/1555-6611/ab5578.
- [150] Маслов, В.П. Асимптотические методы и теория возмущений / В.П. Маслов – М.: Наука, 1988. – 378 с.

- [151] Федорюк, М.В. Асимптотика: Интегралы и ряды / М. В. Федорюк – М.: Наука, 1987. – 544 с.
- [152] Бабич, В.М. Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн / В.М. Бабич, В.С. Булдырев – М.: Наука, 1972. – 456 с.
- [153] Грейсух, Г.И. Оптика градиентных и дифракционных элементов / Г.И. Грейсух, И.М. Ефименко, С.А. Степанов – М.: Радио и связь, 1990. – 136 с.
- [154] Кравцов, Ю.А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю.А Кравцов, Ю.И Орлов – М.: Наука, 1980. – 304 с.
- [155] Боровиков, В.А. Геометрическая теория дифракции / В.А. Боровиков, Б.Е. Кинбер – М.: Связь, 1978. – 248 с.
- [156] Rubinow, S.I. Asymptotic solution of the Dirac equation / S.I. Rubinow, J.V. Keller // *Phys. Rev.* – 1963. – Vol. 2. – P. 131.
- [157] Keller, J. Asymptotic solution of eigenvalue problems / J. Keller, S. Rubinow // *Ann. Phys.* – 1960. – Vol. 9. – P. 24-75.
- [158] Харитонов, С.И. Асимптотический метод расчета поля от оптических элементов, обладающих зонной структурой / С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, М.Л. Каляев // *Компьютерная оптика.* – 2007. – Т. 31, № 4. – С. 7-18.
- [159] Харитонов, С.И. Асимптотические решения скалярного волнового уравнения / С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика.* – 2003. – № 25. – С. 49-53.
- [160] Досколович, Л.Л. Асимптотические решения уравнения Гельмгольца для псевдопериодических структур / Л.Л. Досколович, С.И Харитонов, Н.Л. Казанский, Е.А. Тулупова, С.А. Скуратов // *Компьютерная оптика.* – 2005. – № 27. – С. 50-55.
- [161] Досколович, Л.Л. Асимптотические методы для решения задач дифракции на ДОО / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, М.А. Моисеев, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика.* – 2006. – Т. 30. – С. 49-52.
- [162] Казанский, Н.Л. О прохождении пространственно-ограниченных широкополосных радиально-симметричных сфокусированных импульсов через тонкую плёнку / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика.* – 2012. – Т. 36, № 1. – С. 4-13.
- [163] Kazanskiy, N.L. Asymptotic research in computer optics / N.L. Kazanskiy // *CEUR Workshop Proceedings.* – 2015. – Vol. 1490. – P. 151-161. DOI: 10.18287/1613-0073-2015-1490-151-161.
- [164] Харитонов, С.И. Асимптотический метод решения задач дифракции на непериодических структурах / С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика.* – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 160-168. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-160-168.
- [165] Харитонов, С.И. Гибридный асимптотический метод анализа каустик оптических элементов в радиально-симметричном случае / С.И. Харитонов, С.Г. Волотовский, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика.* – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 175-182. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-175-182.
- [166] Харитонов, С.И. Распространение импульсов поля и расчёт динамических инвариантов в волноводе с выпуклой оболочкой / С.И. Харитонов, С.Г. Волотовский, С.Н. Хонина, Н.Л. Казанский // *Компьютерная оптика.* – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 947-958. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-947-958.
- [167] Харитонов, С.И. Теория катастроф и каустики радиально-симметричных пучков / С.И. Харитонов, С.Г. Волотовский, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика.* – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 159-167. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-159-167.
- [168] Soifer, V.A. Caustics of Vortex Optical Beams / V.A. Soifer, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *Doklady Physics.* – 2019. – Vol. 64(7). – P. 276-279.
- [169] Kharitonov, S. Caustics of the vortex beams generated by vortex lenses and vortex axicons / S. Kharitonov, S. Khonina, S. Volotovskiy, N. Kazanskiy // *Journal of the Optical Society of America A.* – 2020. – Vol. 37(3). – P. 476-482. DOI: 10.1364/JOSAA.382361.
- [170] Попов, В.В. Материалы и методы для создания плоских фокусирующих элементов / В.В. Попов // *Компьютерная оптика.* – 1987. – № 1. – С. 160-163.

- [171] Golub, M.A. The technology of fabricating focusators of infrared laser radiation / M.A. Golub, O.E. Rybakov, G.V. Usplenjev, A.V. Volkov, S.G. Volotovskiy // Optics & Laser Technology. – 1995. – Vol. 27(4). – P. 215-218.
- [172] 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.
- [173] Duparre, M. Investigation of computer-generated diffractive beam shapers for flattening of single-modal CO₂ laser beams / M. Duparre, M.A. Golub, B. Ludge, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev, S.G. Volotovskii // Applied Optics. – 1995. – Vol. 34 (14). – P. 2489-2497.
- [174] Babin, S.V. Data preparation and fabrication of DOE using electron-beam lithography / S.V. Babin, V.A. Danilov // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – Vol. 29, № 4-5. – P. 307-324.
- [175] Volkov, A.V. A Method for the diffractive microrelief formation using the layered photoresist growth / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.J. Moiseev, V.A. Soifer // Optics and Lasers in Engineering. – 1998. – Vol. 29(4-5). – P. 281-288. DOI: 10.1016/s0143-8166(97)00116-4.
- [176] Abul'khanov, S.R. Manufacture of diffractive optical elements by cutting on numerically controlled machine tools / S.R. Abul'khanov, N.L. Kazanskii, L.L. Doskolovich, O.Y. Kazakova // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31(12). – P. 1268-1272. DOI: 10.3103/S1068798X11120033.
- [177] Волков, А.В. Технология изготовления непрерывного микрорельефа дифракционных оптических элементов / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, В.С. Соловьев // Компьютерная оптика. – 1997. – № 17. – С. 91-93.
- [178] Казанский, Н.Л. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков // Микроэлектроника. – 2004. – Т. 33, № 3. – С. 209-224.
- [179] Казанский, Н.Л. Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики / Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2006. – № 29. – С. 58-77.
- [180] Pavelyev, V.S. Formation of diffractive microrelief on diamond film surface / V.S. Pavelyev, S.A. Borodin, N.L. Kazanskiy, G.F. Kostyuk, A.V. Volkov // Optics & Laser Technology. – 2007. – Vol. 39(6). – P. 1234-1238. DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.08.004.
- [181] Казанский, Н.Л. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме газового разряда / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков – М.: Радио и связь, 2009. – 220 с.
- [182] Kazanskiy, N.L. Gas discharge devices generating the directed fluxes of off-electrode plasma / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, V.V. Podlipnov // Vacuum. – 2014. – Vol. 101. – P. 291-297. DOI: 10.1016/j.vacuum.2013.09.014.
- [183] 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.
- [184] 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.
- [185] Тукмаков, К.Н. Изготовление методом лазерной абляции и исследование кремниевого фокусатора излучения терагерцового диапазона с непрерывным дифракционным микрорельефом / К.Н. Тукмаков, М.С. Комленок, В.С. Павельев, Т.В. Кононенко, В.И. Конов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 941-946. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-941-946.
- [186] 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.
- [187] Сисакян, И.Н. 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. – Т. 3. – С. 94-97.

- [188] Дубовский, П.Е. Поверхностная закалка сталей полосковым лучом мощного CO₂-лазера / П.Е. Дубовский, И.Б. Ковш, М.С. Стрекалова, И.Н. Сисакян // Квантовая электроника. – 1994. – Т. 21, № 12. – С. 1183-1185.
- [189] Казанский, Н.Л. Оптическая система для проведения селективной лазерной сублимации компонентов металлических сплавов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 4. – С. 481-486.
- [190] 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.
- [191] Мурзин, С.П. Лазерная сварка разнородных металлических материалов с использованием дифракционных оптических элементов / С.П. Мурзин, Г. Лидль // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 848-855. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-848-855.
- [192] Мурзин, С.П. Селективная модификация двухфазной стали DP 1000 лазерным воздействием с применением дифракционного оптического элемента / С.П. Мурзин, М.В. Блохин // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 773-779. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-773-779.
- [193] Буфетова, Г.А. Твердотельные неодимовые лазеры на основе монокристаллических волокон с поперечным градиентом показателя преломления / Г.А. Буфетов, В.В. Кашин, Д.А. Николаев, С.Я. Русанов, В.Ф. Серегин, В.Б. Цветков, И.А. Щербаков, А.А. Яковлев // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36, № 7. – С. 616-619.
- [194] Bufetova, G.A. Temperature distribution across the growth zone of sapphire (Al₂O₃) and yttrium-aluminum garnet (YAG) single crystal fibers / G.A. Bufetova, S.Ya. Rusanov, V.F. Seregin, Yu.N. Pyrkov, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov // Journal of Crystal Growth. – 2016. – Vol. 433. – P. 54-58.
- [195] Finogenov, L.V. 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.
- [196] Завьялов, П.С. Трехмерный контроль дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок атомных реакторов на основе дифракционных оптических элементов / П.С. Завьялов, Ю.А. Лемешко, Л.В. Финогенов, Ю.В. Чугуй // Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 2. – С. 23-31.
- [197] 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.
- [198] 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.

Focusing DOEs (focusators): design and investigation

V.A. Danilov¹

¹Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Butlerova 15, Moscow, Russia, 117342

Abstract. The paper consistently analyzes the development of the physical and mathematical apparatus and the technological basis for creating laser focusers - a key element of computer optics, which has largely determined the appearance of a new scientific direction and the formation of approaches used in it. The influence of the development of methods for calculating focusers on the creation of other elements of computer optics is analyzed. Examples of effective use of focusers are given.