

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИКА. ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ

### Что такое компьютерная оптика?

Проникновение компьютеров в различные области человеческой деятельности широко известно. Существует термин "компьютерная наука". В широком смысле слова "компьютерная оптика" - это компьютеры в оптике и оптика в компьютерах. Сюда относятся численные решения задачи дифракции, системы автоматизированного проектирования (САПР) и гибкие автоматизированные производства (ГАП) оптических систем, обработка изображений, оптический вычислительный эксперимент, оптические процессоры и запоминающие устройства, цифровая голограмма. В этой работе, однако, авторы хотели показать принципиально новые возможности применения компьютеров для создания широкого класса оптических элементов с ранее недостижимыми функциональными свойствами.

Компьютерная оптика - это получение на основе применения ЭВМ оптических элементов, осуществляющих требуемое преобразование волновых полей.

Компьютерная оптика расширяет гамму конструктивных элементов оптических систем. Помимо традиционных линз, призм и зеркал появляются оптические элементы с более широкими функциональными возможностями. Типичным представителем семейства элементов компьютерной оптики является киноформ [1]. Сочетание киноформных корректоров с обычными линзами позволяет, например, проектировать оптические системы со слабыми сферическими аберрациями [2].

Имеются и другие примеры киноформных оптических элементов [3]. Однако было бы совершенно неправильно сводить задачи компьютерной оптики к синтезу киноформ.

Применение элементов компьютерной оптики открывает совершенно новые возможности в оптике, особенно в когерентной. При этом важно учесть, что элементы компьютерной оптики являются плоскими и, следовательно, обладают меньшими габаритами и весом по сравнению с обычными оптическими элементами.

Термин "компьютерная оптика" нов и поэтому требует пояснений. Сами авторы на протяжении ряда лет для обозначения оптических элементов, синтезируемых на ЭВМ, использовали термин "плоская оптика", причем он в достаточной мере укоренился. Однако указанный термин не отражает роли компьютера в создании оптических элементов, а лишь выражает их массогабаритные свойства и поэтому является достаточно узким. Кроме того, в последнее время возникают идеи нанесения фазового рельефа не на плоскую, а на сферическую или еще более сложную подложку и тогда термин "плоская оптика" становится неприемлемым.

Существо подхода к созданию элементов компьютерной оптики состоит в следующем. Оптический элемент, работающий на пропускание или на отражение излучения, в общем случае характеризуется амплитудно-фазовой функцией (пропускания или отражения соответственно). Эта характеристика должна быть определена, исходя из решаемой задачи преобразования волнового поля. Для

простейших случаев может быть известно ее аналитическое выражение, например, задана фазовая функция сферической или цилиндрической линзы. В общем случае требуется применение ЭВМ для определения характеристики оптического элемента. При этом ЭВМ может использоваться как для численных расчетов, так и для решения обратных задач. Например, при создании оптических элементов, реализующих наборы ортогональных базисных функций, требуется рассчитывать результат интерференции, соответствующий базисной функции с плоской опорной волной, то есть математическую голограмму, и таким образом решать на ЭВМ прямую задачу. А при создании фокусаторов излучения фазовая функция фокусатора определяется из численного решения обратной задачи. Таким образом, на этапе проектирования компьютер используется для определения характеристики создаваемого оптического элемента. После того, как указанная характеристика сформирована в памяти ЭВМ, возникает задача переноса ее на физическую среду с помощью программируемого технологического автомата. На этом этапе компьютер выполняет функции управления технологическим автоматом. Если для управления делительной машиной, изготавливающей дифракционные решетки, применять компьютер нет необходимости в силу простоты траектории резца, то уже при изготовлении зонной пластинки алгоритм управления толщиной колец является достаточно сложным и требует применения цифрового управления. Еще сложнее обстоит дело при изготовлении плоских линз: не только радиусы колец, но и фазовый профиль должен быть программируемым. Вручную изготовить подобные оптические элементы практически невозможно. Итак, на этапе изготовления компьютер используется для управления программируемым технологическим автоматом. После того, как оптический элемент создан, его необходимо экспериментально исследовать и аттестовать. Экспериментальные данные при этом регистрируются, как правило, в виде различного рода распределений интенсивности света: теневых картин, интерферограмм, голограмм. При этом компьютер необходим для обработки, отображения и интерпретации экспериментальных данных, поскольку визуальные наблюдения и

ручная обработка не позволяют получить количественных результатов. Необходимо также отметить, что в компьютерной оптике перспективным методом исследования является вычислительный эксперимент, в котором ключевую роль играет компьютер. Процесс создания элементов компьютерной оптики носит сложный итерационный характер и на компьютер возлагается также функция обеспечения диалога с проектировщиком, технологом и исследователем. Перечисленные функции компьютера объясняют введенный авторами в последнее время термин "компьютерная оптика", а рис. 1 иллюстрирует процесс создания элементов и задачи компьютерной оптики.

Появление компьютерной оптики как самостоятельного научного направления на стыке квантовой электроники, вычислительной математики и информатики во многом стимулировалось работами по цифровой голограммии. Как известно, цифровая голограмма - это получение голограмм и восстановление изображений с физических голограмм при помощи ЭВМ, оснащенных устройствами ввода-вывода и специализированным математическим обеспечением. Имеется более 600 публикаций по цифровой голограммии, выполненных на протяжении двух десятков лет [4]. Значительная часть опубликованных работ относится, собственно говоря, не к получению или анализу голограмм, а к синтезу на ЭВМ пространственных фильтров различного назначения. В частности, работа Козьма и Келли [5] была посвящена машинному синтезу пространственного фильтра для оптической согласованной фильтрации радиолокационного сигнала. С сожалением приходится констатировать, что основная цель цифровой голограммии - создание трехмерного дисплея - на сегодня не достигнута и, видимо, в ближайшем будущем достигнута не будет. Проведенные в этом направлении исследования позволили получить интересные научные результаты прежде всего в области новых методов записи на физическую среду амплитудно-фазовых распределений. Работа Лизема по синтезу киноформа [1], опубликованная более 15 лет назад, имела настолько высокий резонанс, что целый ряд исследователей, в том числе и авторы данной статьи, относили все синтезируемые оптические элементы к семейству киноформных. Однако по

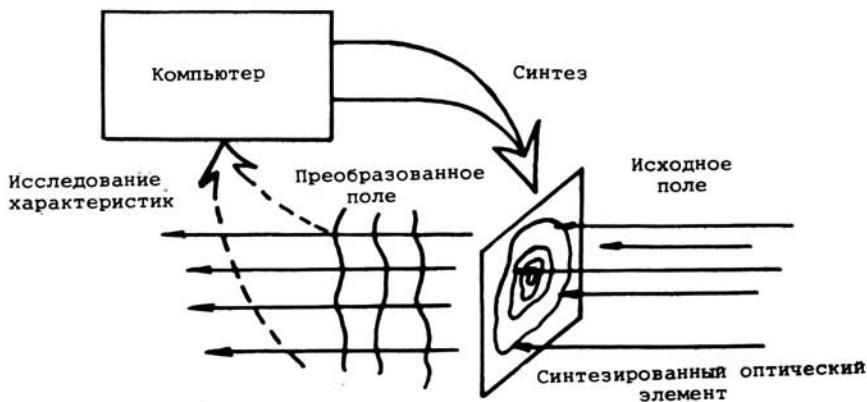


Рис. 1. Компьютерная оптика - получение на основе применения ЭВМ оптических элементов, осуществляющих требуемое преобразование волновых полей

мере создания новых типов синтезированных оптических элементов, то есть к началу 80-х годов, стало ясно, что эти элементы не являются ни киноформными, ни бинарными голограммами Ломана и Ли и никакими другими синтезированными голограммами, точно так же как не являются они зонными пластинками или линзами Френеля, хотя часто и весьма близки к ним по внешнему виду. В указанных обстоятельствах целесообразно говорить об элементах компьютерной оптики и, собственно, о компьютерной оптике, тем более что роль компьютеров в оптике все более возрастает [6, 7].

В компьютерной оптике можно выделить следующие направления:

- решение обратных задач теории дифракции для определения характеристик синтезируемых оптических элементов;
- создание новых технологий записи на физическую среду синтезированных на ЭВМ оптических элементов для различных диапазонов волн электромагнитного излучения;
- исследование погрешностей и aberrаций синтезированных оптических элементов;
- автоматизация экспериментального исследования и проектирования элементов компьютерной оптики;
- создание фокусаторов излучения;
- создание оптических элементов для анализа и формирования поперечно-модового состава излучения;

- создание корректоров волновых фронтов;
- синтез пространственных фильтров для оптических систем обработки информации и оптико-цифровых процессоров;
- создание киноформных линз и "безабберационных" объективов;
- решение задач лазерной технологии, медицины, передачи информации и др. на основе применения элементов компьютерной оптики.

Дадим краткий анализ перечисленных направлений.

### Решение обратных задач теории дифракции в компьютерной оптике

Если задана фазовая функция оптического элемента, то в принципе всегда можно решить задачу дифракции волн на оптическом элементе и получить распределение поля в интересующей нас области. Вычислительные трудности, которые здесь возникают, могут носить серьезный характер и связаны в первую очередь с огромной размерностью задачи. О решении прямой задачи компьютерной оптики мы поговорим позже. Сейчас же речь идет о так называемой обратной задаче. Для уяснения физической сущности рассмотрим рис. 2. Плоский оптический элемент  $\Phi$ , расположенный в области  $G$  плоскости

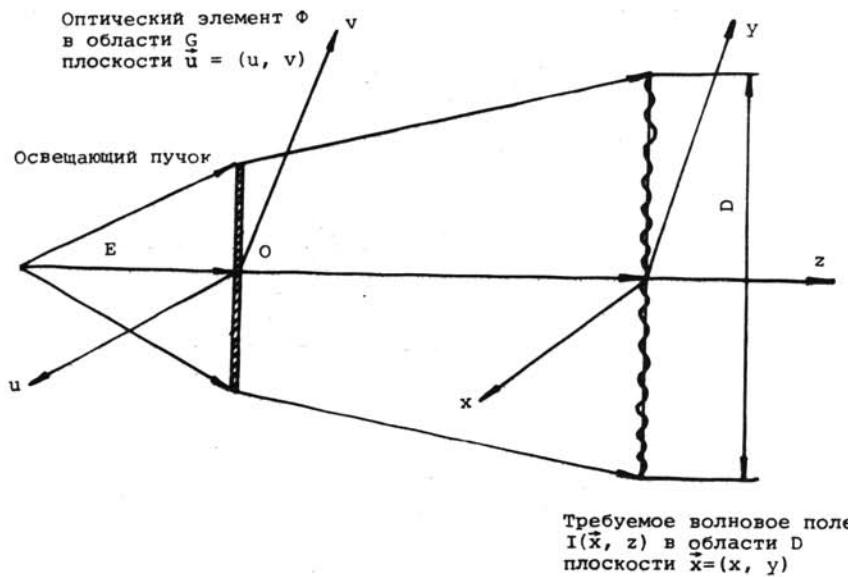


Рис. 2. Постановка задачи формирования  
оптического поля

$\bar{u} = (u, v)$ , освещается пучком Е монохроматического излучения длины волны  $\lambda$ . Требуется сформировать в области D плоскости  $\bar{x} = (x, y)$  волновое поле  $I(\bar{x}, z)$ . Фазовая функция оптического элемента полностью определяет поведение пучка за плоскостью  $\bar{u}$  и, в частности, в интересующей нас области  $\bar{x}$ . Задача состоит в отыскании фазовой функции оптического элемента  $\phi(u, v)$ , обеспечивающей формирование волнового поля. С математической точки зрения обратная задача является некорректной: во-первых, решение может вообще не существовать; во-вторых, оно может быть неоднозначным; в-третьих, оно может быть неустойчивым. Рассмотрим на примерах все три проявления некорректности в задачах фокусировки излучения. Отсутствие решения, как правило, обусловлено ограничениями, налагаемыми на область фокусировки фундаментальными физическими законами. Например, хорошо известно, что нельзя получить в области фокусировки пятно, диаметр которого D меньше, чем дифракционный предел, определяемый поперечным размером d линзы (фокусатора), длиной волны  $\lambda$  и фокусным расстоянием f, то есть  $D \geq \lambda f/d$ . Аналогичные ограничения накладываются на минимально достижимую толщину линии при фокусировке в отрезок в плоскости, перпендику-

лярной оси распространения. Фокусатор в данном случае представляет собой сочетание плоских сферической и цилиндрической линз на одном оптическом элементе. Несколько видоизменяя форму и профиль периферийных зон фокусатора, можно добиться перераспределения интенсивности излучения вдоль отрезка, в частности, добиться равномерного распределения. Минимальная толщина линии по-прежнему определяется отношением  $\lambda f/d$ , где d в данном случае - характерный поперечный размер фокусатора. Решение задачи фокусировки может отсутствовать не только по причине противоречия законам дифракции. В случае, когда область фокусировки не расположена в плоскости перпендикулярно оптической оси, а является, например, трехмерной пространственной кривой, вполне определенные ограничения накладываются из-за того, что в силу закона прямолинейного распространения света перенос энергии осуществляется вдоль оптической оси. Нельзя, в частности, требовать, чтобы при фокусировке в тонкий цилиндр, расположенный вдоль оптической оси, энергия целиком была сосредоточена в нем, а интенсивность вне тонкого цилиндра равнялась нулю. Ясно, что энергия к более удаленным от фокусатора точкам цилиндра переносится

через периферийные области пространственных сечений, более близких к фокусатору.

Неоднозначность в определении фазовой функции фокусатора, иначе говоря, наличие множества различных решений относительно фазовой функции, приводящих к одной и той же области фокусировки, часто возникает в компьютерной оптике. Дело в том, что фокусаторам присуща некая модульность, в формировании требуемой области фокусировки. Рассмотрим фокусатор в отрезок.

Хорошо известно, что произвольный сегмент линзы работает функционально так же, как и вся линза. Поэтому, в частности, сегмент фокусатора, ограниченный прямоугольником, будет фокусировать в отрезок. Минимальная толщина линии из-за дифракционных соотношений возрастет. Сегмент, ограниченный треугольником, также будет фокусатором в отрезок. Записав на одном фокусаторе четыре сегмента, фокусирующих в отрезок, мы можем получить фокусатор в квадрат или в крест. Мысленно представим себе два различных фокусатора. Один из них состоит из четырех прямоугольных, а второй - из четырех треугольных сегментов, но оба фокусатора позволяют сфокусировать излучение в крест. Проявляющуюся в этом неоднозначность решения обратной задачи фокусировки и возмож-

ность получения множества различных фокусаторов, выполняющих одну и ту же функцию, следует рассматривать как положительный фактор, рискуя при этом вызвать недовольство придерживавших единственности решений. Неоднозначность синтеза фокусаторов возникает также в силу специфики записи их фазовой функции, которая, как мы уже говорили, приводится к интервалу от 0 до  $2\pi$ . Рассмотрим процесс получения киноформной линзы, изображенной на рис. 3. Рассеянную линзу на слой толщиной  $\frac{\lambda}{n-1}$

сверху вниз ( $n$  - показатель преломления материала линзы), мы получим систему зон. Однако мы можем выполнить ту же процедуру снизу вверх и получим совершенно другую систему зон. И в этом случае неоднозначность фазовой характеристики фокусатора отрицательной роли не играет. Рассмотрим третье проявление некорректности обратной задачи фокусировки - неустойчивость решений. Она выражается в том, что малым отклонениям в форме области фокусировки и распределении интенсивности на ней могут соответствовать большие изменения фазовой функции оптического элемента. Рассмотрим задачу фокусировки в два параллельных отрезка. Как бы ни было мало расстояние между ними, на фокусаторе должны быть записаны два сегмента со скачком фазы на границе между ними.

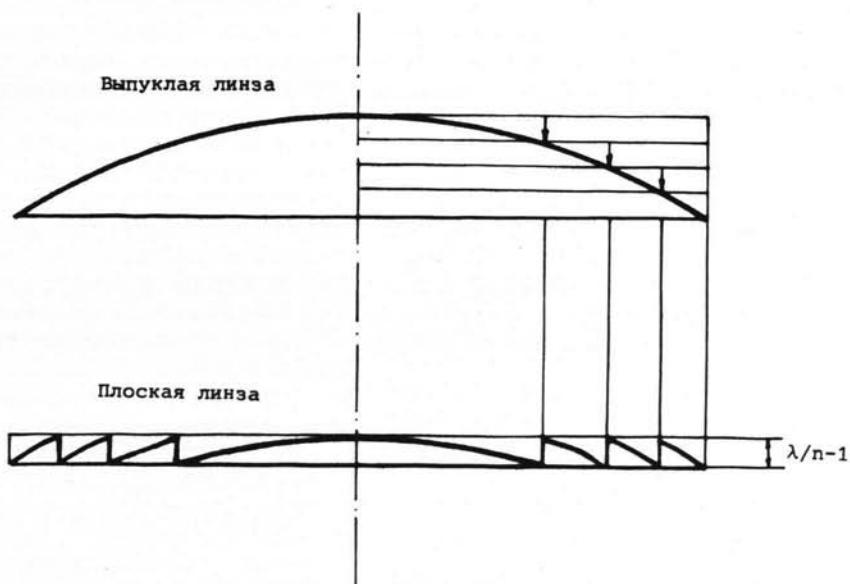


Рис. 3. Получение киноформной линзы

И лишь только в случае полного наложения отрезков одного на другой фазовая функция фокусатора становится гладкой и не имеет точек разрыва. В работах [8, 9] приведены амплитудные маски фокусаторов с разрывной фазовой функцией и результаты фокусировки. Исследования показали, что, несмотря на наличие разрывов, фокусировка выполняется успешно. Однако при большом числе разрывов фазовой функции на фокусаторе и при грубой дискретизации фазового профиля неустойчивость приведет к существенным изменениям фокальной линии и к снижению энергетической эффективности фокусатора.

Обратная задача фокусировки впервые в приближении геометрической оптики поставлена и решена в работе [8], затем ей была дана строгая математическая формулировка, содержащая конструктивную основу синтеза фокусаторов [9], и проведен целый ряд математических обоснований [10, 11].

### Создание элементов компьютерной оптики для различных диапазонов волн

Первые элементы компьютерной оптики - корректоры волновых фронтов [12] и фокусатор [13] - были созданы для диапазона видимых волн. К настоящему времени создано значительное количество элементов компьютерной оптики для инфракрасного [14], субмиллиметрового и миллиметрового [15] диапазонов. При этом, в сущности, создан ряд новых технологий получения оптических элементов, ориентированных на использование различных технологических автоматов. Первые элементы были получены по технологии, разработанной в цифровой голографии [16]: амплитудная маска фазового элемента, полученная на многоградационном фотопостроителе, подвергалась отбеливанию, в результате чего на оптическом элементе формировался фазовый рельеф. В дальнейшем эта технология была дополнена процедурой фотоумножения амплитудной маски для получения более высокого пространственного разрешения.

Первые отражательные оптические элементы - фокусаторы были получены [8] путем нанесения металлического покрытия на стеклянную подложку с

фазовым рельефом. В дальнейшем для получения фокусаторов, ориентированных на применение в лазерных технологических установках, был применен процесс гальванопластики [17], в результате которого сложный фазовый рельеф переносился с металлизированного стекла на медь и получался силовой оптический элемент. При использовании бинарных фотопостроителей получают наборы масок и, последовательно применяя их в фотолитографической установке, получают многоградационный фазовый рельеф [3, 18].

Для получения элементов компьютерной оптики в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах используют станки с числовым программным управлением [15].

### Исследование характеристик точности синтезированных оптических элементов

По исследованию aberrаций сферической линзы написаны тома, и на сегодняшний день этот вопрос нельзя считать исчерпанным. Создание каждого нового элемента компьютерной оптики требует проведения исследований характеристик точности. Оно особенно необходимо для синтезированных оптических элементов, поскольку здесь имеют место погрешности дискретизации и квантования волновых полей в ЭВМ.

Перспективным, по нашему мнению, является исследование предельных характеристик точности [19, 20], дающее ответ на вопрос об области "возможного и невозможного" в компьютерной оптике. Такое исследование позволяет обоснованно предъявить требования к используемым технологическим средствам и заставляет отказаться от дорогостоящих, но тщетных попыток реализовать с помощью ЭВМ оптические элементы с характеристиками, лежащими в области "невозможного".

### Проблемы автоматизации экспериментальных исследований и проектирования в компьютерной оптике

Создание элементов плоской оптики с помощью ЭВМ - процесс сложный. Он включает в себя решение

некорректной обратной задачи, требует применения оптико-электронной аппаратуры регистрации изображений и связан с использованием различных технологий получения фазового рельефа. Каждый из этих этапов существенно влияет на качество изготавляемого оптического элемента и заранее трудно предсказать точные значения его характеристик, таких, например, как толщина линии фокусировки и энергетическая эффективность фокусатора или дифракционная эффективность оптического элемента, согласованного с набором поперечных мод. В этой связи процесс создания оптических элементов с помощью ЭВМ становится итерационным: исследуя характеристики синтезируемого элемента на различных этапах его изготовления, мы вырабатываем рекомендации к их улучшению. Эта ситуация типична для процесса проектирования вообще и для автоматизированного проектирования в частности. Как видим, важную роль здесь играет исследование полученных характеристик оптических элементов, основанное на проведении экспериментов. В компьютерной оптике требуется проводить два вида экспериментов: вычислительные и натурные, причем и тот, и другой требуют применения ЭВМ, в первом случае по определению, а во втором в силу высокой информативности объекта исследования и сложности обработки оптических изображений.

Сначала о вычислительном эксперименте в компьютерной оптике. Он состоит в следующем. Пусть в результате решения обратной задачи фокусировки получена фазовая функция фокусатора и записана в виде массива чисел в памяти ЭВМ. Для того, чтобы убедиться в успешности решения обратной задачи и прогнозировать характеристики создаваемого фокусатора, не обязательно сразу изготавливать его в виде оптического элемента и проводить натурный эксперимент в оптической системе. Более того, натурный эксперимент позволит исследовать характеристики оптического элемента, полученные в результате совместного действия всех этапов его изготовления, включая и технологию. Конечно, мы убедимся в работоспособности (или неработоспособности) полученного фокусатора, но провести тонкое исследование распределения интенсивности излучения в фокальной области в за-

висимости от фазовой функции, полученной в результате решения обратной задачи, мы не сможем. Чтобы получить интересующие нас данные, следует провести эксперимент с массивом чисел, описывающих синтезированную фазовую функцию фокусатора, то есть математически решить задачу дифракции излучения на соответствующем фокусаторе. Причем результаты следует получить не в виде миллионов чисел, от которых пестрит в глазах, а в виде, привычном для оптика - экспериментатора, а это - полутонаовые распределения яркости на экране телевизионной трубки, графики кривых, компактные таблицы обработанных экспериментальных данных. Для решаемой задачи очень желательно также представить трехмерные распределения в изометрии и в цвете. Отсюда следует, что компьютер, предназначенный для проведения вычислительных экспериментов, должен быть оборудован средствами машинной графики и визуализации изображений графопостроителями, графическими, полутонаовыми и цветными дисплеями. И именно сочетание математических методов и программ решения разнообразных задач дифракции со средствами визуализации изображений позволяет производить вычислительные эксперименты в компьютерной оптике [21]. На рис. 4 показан один из результатов вычислительного эксперимента с фокусатором в кольце. Эксперимент, в частности, выявил наличие принципиально неустранимого всплеска интенсивности в центре кольца, причем фокусировка в центр кольца в наибольшей степени проявляется в плоскости, отстоящей от плоскости кольца на вполне определенное расстояние вдоль оси распространения излучения. Результаты вычислительного эксперимента позволяют оптимизировать решение обратной задачи фокусировки, прогнозировать характеристики синтезируемых оптических элементов.

Для проведения натурных экспериментов в компьютерной оптике необходимо оснастить ЭВМ средствами ввода оптических изображений в цифровую память. Для этого можно использовать разнообразные преобразователи оптического сигнала в электрический: передающие телевизионные трубы на основе видиконов, фотодиодные матрицы, приборы с переносом заряда. Электрический сигнал

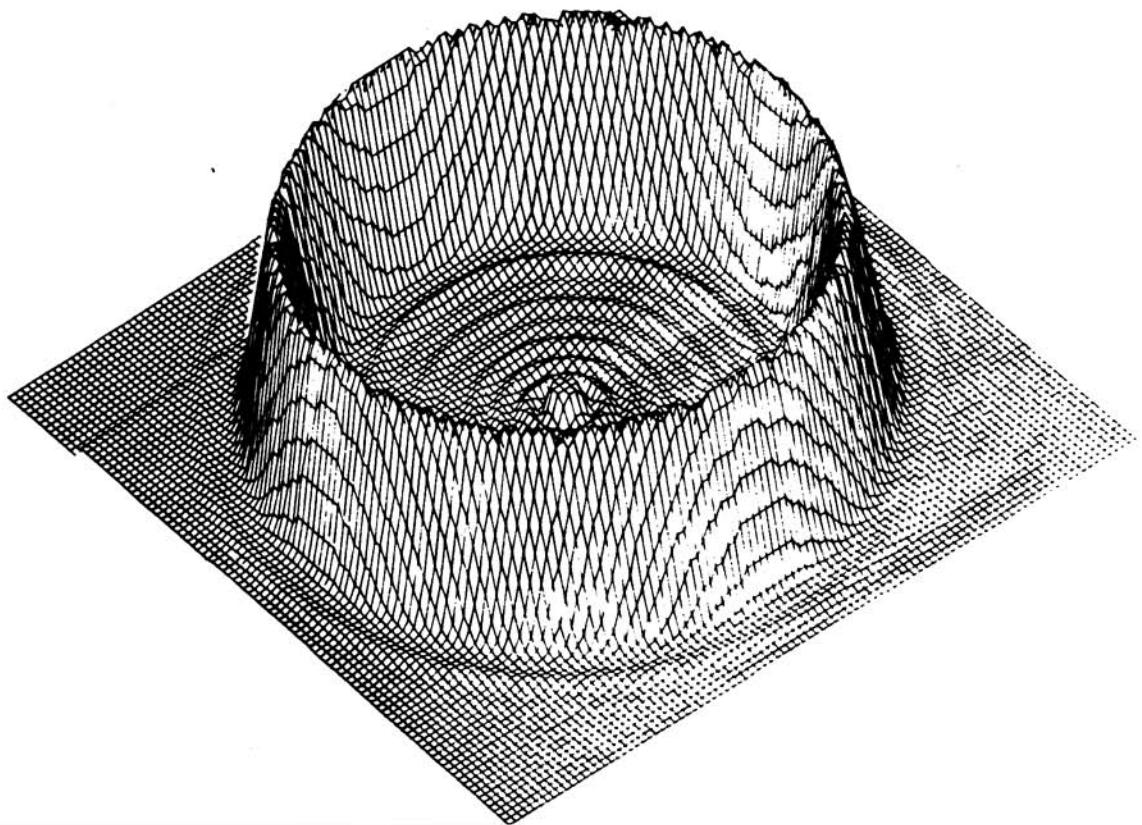


Рис. 4. Вычислительный эксперимент с фокусатором в кольце

затем должен быть преобразован в цифровой код и записан в память компьютера. Техническая сторона этого вопроса не содержит трудностей принципиального характера. Основная трудность состоит в разработке цифровых методов анализа оптических сигналов. Здесь опять, как и в задаче синтезо-оптических элементов, мы сталкиваемся с необходимостью обрабатывать на ЭВМ двумерные массивы чисел и решать некорректные обратные задачи. Решение осложняется тем, что зарегистрированный и записанный в память ЭВМ двумерный сигнал содержит, помимо полезной информации, различного рода мешающие факторы — погрешности возмущения и искажения. Причин для появления мешающих факторов много: это неравномерность освещения регистрируемого изображения, вибрации, колебания напряжения в регистрирующей аппаратуре, квантование непрерывного сигнала и т.п.

Еще одна проблема автоматизации — это создание банка данных, ориентированного на задачи компьютерной оптики. К сегодняшнему дню

создано уже несколько десятков различных работоспособных элементов компьютерной оптики. В системе автоматизированного проектирования элементов компьютерной оптики должна иметься не только текстовая информация о существующих аналогах. В ней должны храниться расчетные формулы, массивы двумерных данных — фазовые функции элементов и другие необходимые сведения, относящиеся к данной предметной области. Создание такой базы данных, видимо, потребует разработки специфичной системы управления базой данных и входного языка проектировщика.

### Фокусаторы излучения

Термин "фокусатор" впервые введен в 1981 г. в работе [13] и укоренился среди специалистов. Более того, фокусаторами иногда называют все элементы компьютерной оптики, что, конечно же, неправильно.

Постановка задачи синтеза фокусаторов физически прозрачна.

На рис. 5 изображены изофоты в фокальной области линзы. Только приближенно можно считать, что линза фокусирует излучение в точку, называемую фокусом. На самом деле на рисунке видно, как сгущаются изофоты около этой точки; однако, и в других точках фокальной области имеет место сложное распределение интенсивности света. А можно ли создать оптический элемент, фокусирующий не в точку, как обычная линза, а в фокальную кривую или область с заданным распространением интенсивности на ней? Этот вопрос был поставлен примерно шесть лет назад. И сегодня на него дан положительный ответ, причем не только теоретический, но и практический: фокусаторы излучения существуют как новый класс оптических элементов. Зачем нужны фокусаторы? Прежде всего для лазерных технологических установок в промышленности и в медицине. Лазер без фокусатора – это только генератор излучения, лазер с фокусатором – это технологическая установка на определенный тип операции, лазер с набором фокусаторов – это уже компонент гибкой производственной системы с программируемым режимом производственных операций. Но технология – не единственная область применения фокусаторов излучения. Закон пространственного распределения энергии в фокальной области оп-

тической системы определяет режим нагрева мишней при лазерном управляемом термодинамическом синтезе, течение химических реакций, стимулированных лазерным излучением. В оптическом приборостроении часто требуется сложная форма фокальной кривой.

На сегодняшний день созданы фокусаторы излучения в видимом, инфракрасном, субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах с высокой дифракционной эффективностью при различных фокальных линиях, с регулировкой интенсивности вдоль фокальной линии. Эти результаты хорошо известны из многочисленных публикаций [13, 14]. Имеются технические трудности в изготовлении фокусаторов в видимом диапазоне, связанные с отсутствием устройств регистрации изображений, подобных описанному в [22].

### Оптические элементы для анализа и формирования поперечно-модового состава излучения

Оптические элементы этого класса впервые созданы в 1982 г. [23] и уже к настоящему времени позволили решить целый ряд практически интересных задач, связанных с примене-

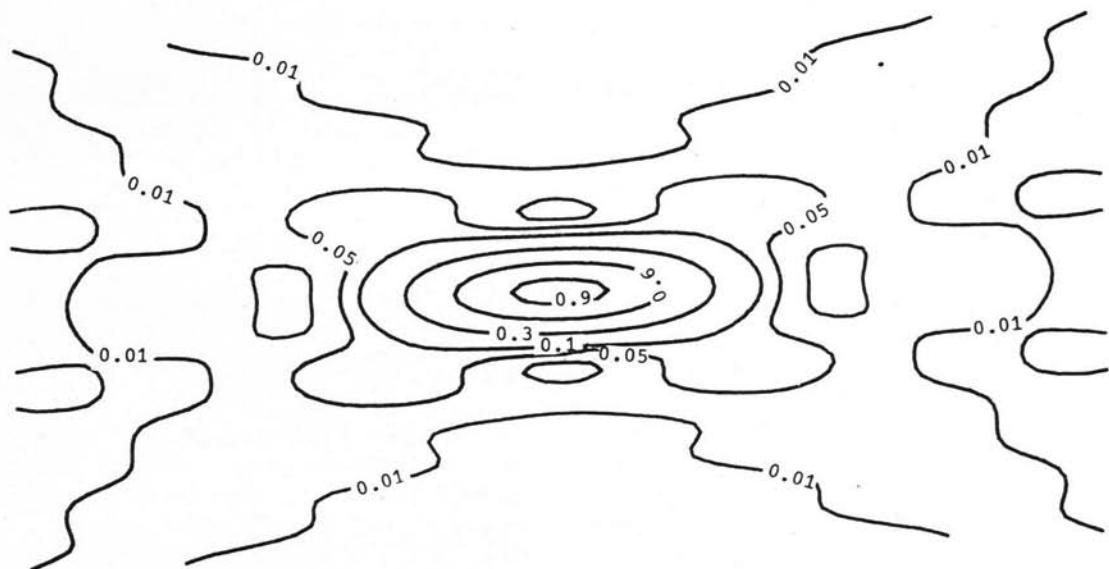


Рис. 5. Изофоты линзы

нием градиентных волоконных световодов [24-26]. Задача анализа и формирования поперечно-модового состава лазерного излучения может быть успешно решена с помощью синтезированных на ЭВМ элементов плоской оптики. Каждой моде соответствует известная математическая функция двух переменных  $\Psi_k(u, v)$ . Компьютер формирует в своей памяти двумерный массив чисел, соответствующий моде с номером  $k$ , а фотопостроитель переводит числа в значения оптической плотности на фотоматериале. В результате получаем набор плоских оптических элементов, соответствующих различным модовым функциям. Используя их как оптические элементы, можно построить прибор для анализа и формирования поперечно-модового состава излучения. Рассмотрим принцип действия анализатора. Многомодовое излучение падает на транспарант, пропускание которого определяется функцией  $\Psi_k(u, v)$ . Интенсивность света в фокусе выходной линзы при этом равна интенсивности  $k$ -й моды. Меняя транспаранты, можно измерить интенсивность различных мод и таким образом решить задачу анализа поперечно-модового состава. На практике на одном оптическом элементе с использованием голограммического метода можно записать сразу несколько модовых функций [27]. При освещении такого транспаранта многомодовым излучением мы одновременно в различных точках фокальной плоскости линзы замеряем интенсивность различных мод. Описанный оптический элемент подобен дифракционной решетке, разделяющей по углам излучение различных длин волн. Однако в данном случае решается гораздо более сложная задача: по углам разделяются поперечно-модовые составляющие излучения. Имея набор оптических элементов, согласованных с модовыми функциями, можем решить также и задачу формирования требуемого поперечно-модового состава лазерного излучения. Как практически использовать возможность формирования излучения с заданным поперечно-модовым составом? Поскольку при распространении излучения в волоконном световоде поперечно-модовая структура его обладает устойчивостью, имеется возможность уплотнить канал передачи информации. Для этого нужно использовать в качестве переносчиков со-

общений колебания, соответствующие различным поперечным модам. Число одновременно возбуждаемых на входе ВОЛС колебаний может составлять от нескольких единиц до нескольких десятков. Каждое колебание - переносчик несет свое сообщение и распространяется по волоконному световоду независимо от других переносчиков. На выходе ВОЛС проводится анализ поперечно-модового состава излучения и индивидуальная демодуляция сообщения в каждой из выделяемых мод. Пропускная способность ВОЛС при модовом уплотнении резко возрастает. При этом усложнение аппаратуры связи, особенно на приемном конце, не очень существенно.

Теперь уместным будет обсудить физический смысл поперечно-модовых разложений излучения и ответить на вопрос: "Являются ли поперечные моды выдумкой математиков или же действительно излучение в неоднородной среде состоит из множества мод?"

Аналогичный вопрос ставился в дискуссии о природе белого света: "В самом деле в солнечном свете есть монохроматические волны различного цвета или мы только математически выражаем этот процесс суммой синусоид?" Современная точка зрения на последний вопрос состоит в том, что спектральное разложение приобретает конкретный физический смысл при взаимодействии излучения со спектральным прибором. В этом случае оно оказывается физически адекватным представлением, соответствующим сущности физической задачи. Точно так же и разложение излучения по модам становится физически адекватным и целесообразным при взаимодействии излучения с анализатором мод. В этой связи создание прибора для анализа поперечных мод излучения на базе элементов компьютерной оптики является принципиальным шагом от математической абстракции к физически адекватному представлению излучения в неоднородной среде как суммы множества поперечных мод. Примечательно, что этот шаг удалось сделать только на основе применения компьютера. В природе нам не известны генераторы эталонных поперечных мод, подобные генераторам монохроматического излучения. Отсутствуют также оптические элементы, подобные призмам и дифракционным решеткам, но предназначенные для проведения поперечно-модового анализа. Таким образом компьютерная опти-

ка восполняет существующий пробел путем создания искусственных эталонов физических величин по их математическим моделям. Вполне возможно, что в дальнейшем будут открыты новые физические явления и созданы соответствующие приборы без применения компьютеров. Однако это уже ни в коей мере не повлияет на оценку роли компьютерной оптики в задаче анализа и формирования поперечно-модового состава излучения.

## Создание корректоров волновых фронтов

Огромные возможности открывает компьютерная оптика для получения оптических элементов, позволяющих сформировать волновой фронт заданной формы. К числу таких элементов принадлежат компенсаторы [12] - элементы, преобразующие плоский или сферический волновой фронт в асферический произвольного порядка. Основное назначение компенсаторов - контроль оптических поверхностей. При этом компенсатор формирует эталонный волновой фронт для интерферометрического исследования изготавливаемой оптической поверхности или же играет роль "нулевой линзы", сводя асферическую задачу к сферической и позволяя использовать теневой метод контроля.

К настоящему времени с использованием специальных технологических автоматов создан целый ряд компенсаторов, в основном для контроля сферических поверхностей [28]. Создание компенсаторов для асферики остается практически нерешенной проблемой и требует прежде всего создания нового поколения прецизионных технологических автоматов с программируемой траекторией движения исполнительного элемента. Исследования предельных характеристик точности [29] показывают принципиальную возможность создания оптических элементов для формирования асферических волновых фронтов с погрешностью порядка  $\lambda/100$  в видимом диапазоне волн.

## Синтез пространственных фильтров для оптической обработки информации

Опубликовано несколько десятков работ [4] по гибридным оптико-циф-

ровым процессорам. Однако широкого применения в системах обработки информации (в частности, изображений) такие процессоры пока не получили. На то имеется ряд объективных причин. Прежде всего, оптическая обработка уступает цифровой в смысле точности и универсальности, наличие в оптических процессорах большого числа механических элементов делает их металлоемкими и нестабильными в работе. До сих пор не решена проблема эффективного взаимодействия оптического и цифрового процессоров. Однако если вспомнить, что для выполнения двумерного преобразования Фурье требуются существенные затраты ресурсов высокопроизводительной ЭВМ, а оптический процессор выполняет такое преобразование в реальном времени, становится понятным большое внимание исследователей к этому перспективному направлению.

В этой связи авторы считают исключительно перспективным направлением в компьютерной оптике создание элементов Бессель-оптики [30], элементов для преобразования декартовых координат в полярно-логарифмические [31], а также программируемых дифракционных решеток [32].

## Создание киноформных линз и "безаберрационных" объективов

Решение этих задач имеет большое прикладное значение. Имеются практические достижения в создании киноформных линз большой светосилы [3]. Сообщается о создании "безаберрационных" объективов, содержащих несколько киноформных линз и обладающих прекрасными массогабаритными характеристиками [33].

## Решение задач науки, техники и медицины с применением элементов компьютерной оптики

Компьютерная оптика возникла из потребностей целого ряда областей деятельности человека, прежде всего из задач физики, оптического приборостроения, лазерной технологии, волоконной связи и т.п. Поэтому вполне естественно, что создаваемые элементы компьютерной оптики немедленно используются в решении различного рода задач. Ряд примеров,

илюстрирующих это утверждение, приведен в предыдущих разделах. Хотелось бы подчеркнуть одно обстоятельство. Применение элементов компьютерной оптики может оказать революционизирующее воздействие, в частности, на лазерную технологию. Применение фокусаторов позволяет производить одномоментные операции на глазе [34], появляются совершенно новые технологии обработки материалов в промышленности [35]. Огромные перспективы имеет применение оптических элементов для анализа и формирования поперечно-модового состава в волоконно-оптических линиях связи и в датчиковой аппаратуре. Для решения прикладных задач необходимо привлечь внимание ученых и специалистов из смежных областей науки, техники и медицины к возможностям компьютерной оптики.

## Горизонты компьютерной оптики

Роль компьютеров в оптике далеко не исчерпывается рассмотренными задачами синтеза элементов плоской оптики. В отборе материалов для этой статьи естественным образом оказались научные интересы авторов и желание осветить революционную роль компьютера в древнейшей науке - оптике. Однако воздействие ЭВМ на оптику происходит по множеству направлений. Во-первых, сформировалась вычислительная оптика как отрасль оптического приборостроения, решающая задачу проектирования на основе применения ЭВМ оптических систем, удовлетворяющих требованиям

к качеству формируемого изображения. Интересно, что вычислительная оптика возникла задолго до появления ЭВМ в задачах создания высококачественных объективов для фотографии. Применение ЭВМ в вычислительной оптике позволило поставить вопрос об автоматизации проектирования оптических систем различного назначения: астрономических телескопов, микроскопов, проекционных устройств, фотографических объективов и т.п. из имеющихся конструктивных оптических элементов: линз, призм, зеркал и т.п. Заметим, что включение элементов плоской оптики в этот набор позволит существенно расширить функциональные возможности целого ряда оптических систем. Во-вторых, продолжает активно развиваться цифровая голография. В-третьих, возникли системы технического зрения, имитирующие способность живых органов получать информацию об окружающей действительности за счет падающего на них света. Созданные к настоящему времени системы технического зрения обладают пока еще очень низкими информационными способностями и в основном являются цифровыми, близкими по духу к системам цифровой обработки оптических изображений. В них не реализованы оптические возможности глаза, нет оптической обработки информации, реализующей способность распознавать образы. Однако нет сомнения в том, что в последующих поколениях технического зрения значительное место займут элементы компьютерной оптики, реализующие ключевые функции обработки и анализа оптических сигналов.

## Л и т е р а т у р а

1. L e s e m L.B., H i r s c h P.M., J o r d a n J.A. - Opt. Spectra, December 1970, vol. 4, p. 18.
2. C l o s e D.H. - Opt. Eng., 1975, vol. 14, № 5, p. 408.
3. К о р о н к е в и ч В.П. и др. - Автометрия, 1985, № 1, с. 4.
4. Д а в ы д к и н а В.Ю., К а р на у х о в В.Н., М е р з л я к о в Н.С. Цифровая голография. Краткий обзор и библиографический указатель с автоматизированной выборкой публикаций. ИППИ АН СССР, М., 1982. - 106 с.

5. К о з м а А., К e l l y D.L. - Appl. Opt., April 1965,  
vol. 4, № 4, p. 387.
6. Вычислительная оптика: Справочник. / Под ред. М.М. Руси-  
нова. - Л.: Машиностроение, 1984. - 423 с.
7. Компьютеры в оптических исследованиях. / Под ред. Б. Фри-  
дена. - М.: Мир, 1983. - 488 с.
8. Д а н и л о в В.А., П о п о в В.В., П р о х о -  
р о в А.М., С а г а т е л я н Д.М., С и с а к я н И.Н., С о й -  
ф е р В.А. - Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, вып. 13, с. 810.
9. Гончарский А.В., Данилов В.А., Попов В.В.,  
Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. - ДАН СССР,  
1983, т. 273, № 3, с. 605.
10. Гончарский А.В., Сисакян И.Н., Степа-  
нов В.В. - ДАН СССР, 1984, т. 279, № 1, с. 68.
11. Гончарский А.В., Степанов В.В. - ДАН СССР,  
1984, т. 279, № 4, с. 788.
12. Г о л у б М.А., Ж и в о п и с ц е в Е.С., Ка р п е е в С.В.,  
П р о х о р о в А.М., С и с а к я н И.Н., С о й ф е р В.А. - ДАН СССР,  
1980, т. 253, № 5, с. 1104.
13. Г о л у б М.А., Ка р п е е в С.В., П р о х о р о в А.М.,  
С и с а к я н И.Н., С о й ф е р В.А. - Письма в ЖТФ, 1981, т. 7,  
вып. 10, с. 618.
14. Г о л у б М.А., Д е г т я р е в а В.П., К л и м о в А.Н.,  
П о п о в В.В., П р о х о р о в А.М., С и с а к я н Е.В., С и с а -  
к я н И.Н., С о й ф е р В.А. - Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, вып. 8,  
с. 449.
15. Б у л а т о в Е.Д., Г р и д и н С.А., Д а н и л е н к о А.А.  
Изготовление элементов плоской оптики миллиметрового и субмилли-  
метрового диапазона на серийных промышленных станках с числовым  
программным управлением. - См. настоящий сборник.
16. Ка р нау х о в В.Н., М е р з л я к о в Н.С. - В сб.: Воп-  
росы кибернетики, 1978, вып. 38, с. 154.
17. П о п о в В.В. Плоские оптические элементы для фоку-  
сировки монохроматического излучения ИК-диапазона, синтезиру-  
емые на ЭВМ. - Диссер. на соискание ученой степени канд.  
физ.-мат. наук. - М., 1985.
18. M i k h a l t s o v a I.A., N a l i v a i k o V.I.,  
S o l d a t e n k o v I.S. - Optik, 1984, 67, 267.
19. Г о л у б М.А. Исследование характеристик и реализа-  
ция когерентно-оптических пространственных фильтров, синтезиру-  
емых с помощью ЭВМ. Автореферат канд. диссер. - М.: ФИАН,  
1981. - 23 с.

20. Голуб М.А., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. Машинный синтез оптических компенсаторов для получения асферических волновых фронтов. Препринт ФИАН, № 29, М., 1981. - 84 с.
21. Васин А.Г., Голуб М.А., Данилов В.А., Казанский Н.Л., Карпееев С.В., Сисакян И.Н., Сойфер В.А., Уваров Г.В. Расчет и исследование когерентного волнового поля в фокальной области радиально-симметричных оптических элементов. Препринт ФИАН, № 304, М., 1983, с. 38.
22. Лазерный построитель высоконформативных изображений. - ИА и Э СО АН СССР, Новосибирск, 1986. - 8 с.
23. Голуб М.А., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. - Квантовая электроника, 1982, 9, № 9, с. 1866.
24. Голуб М.А., Карпееев С.В., Кривошлыков С.Г., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. - Квантовая электроника, 1983, 10, № 8, с. 1700.
25. Garitschev V.P., Golub M.A., Karpeev S.V., Krivoshlykov S.G., Petrov N.I., Sissakian I.N., Soifer V.A., Haubenreisser W., Jahn I.-U., Willsch R. - Optics Communications, October 1985, vol. 55, № 6, p. 403.
26. Голуб М.А., Карпееев С.В., Кривошлыков С.Г., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. - Квантовая электроника, 1984, 11, № 9, с. 1869.
27. Sissakian I.N., Soifer V.A. The 5-th International Conference of Lasers and their Applications. Abstracts. Dresden, GDR, 1985, p. 23.
28. Ларинов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С. - Оптика и спектроскопия, 1972, т. 32, вып. 2, с. 396.
29. Sissakian I.N., Soifer V.A. Elements of Fine Optics generated by Computer. Laser and Applications, Bucharest, 1982, p. 853.
30. Березный А.Е., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. - ДАН СССР, 1984, т. 274, № 4, с. 802.
31. Березный А.Е., Сисакян И.Н. - В сб.: Оптическая запись и обработка информации. / Под ред. В.А. Сойфера. - Куйбышев, 1986, с. 22.
32. Березный А.Е., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. - ДАН СССР, 1984, т. 274, № 4, с. 802.
33. Ган М.А. - Оптика и спектроскопия, 1979, т. 47, № 4, с. 759-763.