

детельствуют об эффективности разработанного метода применительно к задаче восстановления утраченных фрагментов сигнала. Отметим, что вне дефектной области алгоритм вообще не изменяет значений сигнала. Одной из положительных особенностей рассмотренной процедуры восстановления утраченных фрагментов сигнала является то, что все операции организуются над блоками данных одинакового размера, что позволяет удобно реализовать предложенный алгоритм на спецпроцессорах, предназначенных для обработки сигналов. Отметим также, что область применения данного метода не ограничивается рассмотренной здесь задачей. Он может с успехом применяться для выявления скрытых периодичностей [7], а также для решения вырожденных систем линейных алгебраических уравнений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений.— М.: Сов. радио, 1979.
2. Чичагов А. В. Цифровая реставрация фонодокументов на ЭВМ // Техника кино и телевидения.— 1986.— № 1.
3. Морозов В. А., Поспелов В. В. Цифровая обработка сигналов.— М.: МГУ, 1986.
4. Капеллини В., Константинович А. Дж., Эмилиани П. Цифровые фильтры и их применение.— М.: Энергоиздат, 1983.
5. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений.— М.: Мир, 1980.
6. Худсон Д. Статистика для физиков.— М.: Мир, 1970.
7. Гребеников Е. А., Киоса М. Н., Миронов С. В. Численно-аналитические методы исследования регулярно возмущенных многочастотных систем.— М.: МГУ, 1986.

*Поступила в редакцию 29 января 1987 г.*

УДК 621.373.826 : 315.61

Ю. А. БЫКОВСКИЙ, А. В. КАЗАКЕВИЧ, В. Ф. ЛАМЕКИН,  
А. В. МИРОНОС, В. Л. СМЕРНОВ

*(Москва)*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Обработка аналоговой информации основывается на понятии качества изображения, которое, однако, не имеет точного математического выражения. Наиболее полно поведение оптической системы (ОС) описывается когерентной передаточной функцией [1] (КПФ), но на практике методы ее измерения достаточно сложны [2]. В силу исторически сложившихся традиций в теории информатики [3] и с точки зрения практического применения для оценки качества передачи информации используют понятие информативной емкости системы, которое характеризует количество пространственной информации, обрабатываемой данной оптической схемой.

По определению, предложенному в [4], максимальная информационная пропускная способность выражается следующим образом:

$$C = LA \log_2(k + 2) \text{ бит.} \quad (1)$$

Произведение апертуры оптической системы  $L$  на предельное разрешение  $A$  задает число независимых элементов (каналов) разрешения системы, а  $k$  — число уровней квантования яркости в каждом элементе разрешения и характеризует шум. Как разрешение, так и шумовые эффекты определяются частотной зависимостью КПФ, искажениями, возникающими на неоднородностях ОС, а также детектированием. При детектировании рассматриваемые характеристики связаны со свойствами фото-

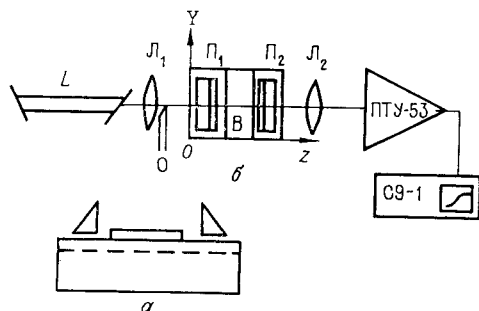


Рис. 1. Волноводная оптическая система «диффузионный стеклянный волновод — ТПВ с призмными элементами ввода-вывода» (а); оптическая схема для определения информативных характеристик волноводного канала (б):

L — излучатель,  $L_1$  и  $L_2$  — сферические линзы, O — объект (оптический нож или мира Фуко), В — волноводная структура,  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  — призмные элементы связи

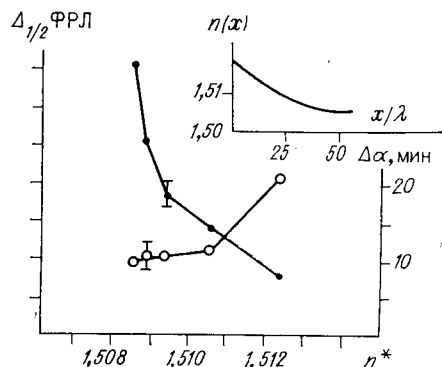


Рис. 2. Зависимости полуширины ФРЛ (●) и углового резонанса (○) от эффективного показателя преломления моды для различных мод диффузионного стеклянного волновода с профилем показателя преломления, представлены на вставке

приемников, а в случае использования в ОС фото- и голографических процессов со свойствами и параметрами фоточувствительного материала [4]. Для гауссова распределения сигнала и шума формула (1) приобретает следующий вид [5]:

$$C = LA \log_2(1 + S/N), \quad (2)$$

где  $S$  и  $N$  — мощности сигнала и шума соответственно. В дальнейшем будем пользоваться этим приближением.

В данной работе изучаются информативные характеристики волноводных голографических структур. Исследуемая ОС состоит из волноводной голограммы (ВГ) и оптических элементов, формирующих записывающие и считывающие пучки. Под оптическими элементами понимаются, главным образом, призмно-волноводные узлы связи и волноводный канал, которые определяют апертуру ОС при записи и могут вносить искажения, не характерные для объемных схем. В связи с этим представляется целесообразным исследовать информационную пропускную способность волноводной ОС без голографического элемента. Обсуждению данного вопроса посвящен разд. 1 настоящей работы. Свойства ВГ рассматриваются в разд. 2. Основные результаты работы и выводы формулируются в заключительной части статьи.

**1. Информационные характеристики волноводной ОС.** Рассматриваемая волноводная ОС (рис. 1, а) представляет собой диффузионный стеклянный волновод, на поверхность которого нанесен фоточувствительный слой халькогенидного стекла ( $As_2S_3$ ). В качестве элементов ввода и вывода излучения использовались стеклянные призмы из стекла марки ТФ-5.

Апертуру рассматриваемой ОС, характеризующую полосу пропускания пространственных частот, можно представить в виде набора щелей, число которых соответствует количеству мод волноводной структуры. Протяженность каждой щели определяется размером области связи в направлении  $OY$  (см. рис. 1), а ширина — угловым резонансом соответствующей волноводной моды. На рис. 2 приведена зависимость ширины углового резонанса волноводного канала по полувысоте от эффективного показателя преломления моды для диффузионного стеклянного волновода. За величину апертуры, в направлении  $OY$  может быть принята наименьшая из областей связи призмно-волноводных узлов ввода-вывода, которая составляла  $\sim 13,4$  мм. Для уменьшения модуляции эффективности связи по зоне связи вводной и выводной призм использовалась иммерсия. Поскольку волноводная мода из направлений дискретна и шири-

на каждого элемента (щели)  $\leq 1^\circ$ , то использование одной моды волновода позволяет оперировать одной строкой двумерного массива информации или одномерными объектами. Использование многомодовых волноводов для передачи двумерного изображения сопряжено с искажениями, возникающими в результате различия фазовых скоростей распространения мод. Фазовый сдвиг между модами минимизирован в волноводах с параболическим профилем показателя преломления [6]. Таким образом, для большинства волноводных ОС каждую моду можно рассматривать как отдельный канал передачи информации, информативная емкость которого

$$C_i = LA_i \log_2(1 + [S/N]_i), \quad (3)$$

где  $i = 0 \dots (m - 1)$  — индекс моды волновода, а полная информативная емкость системы

$$C = L \sum_{i=0}^{m-1} A_i \log_2(1 + [S/N]_i). \quad (4)$$

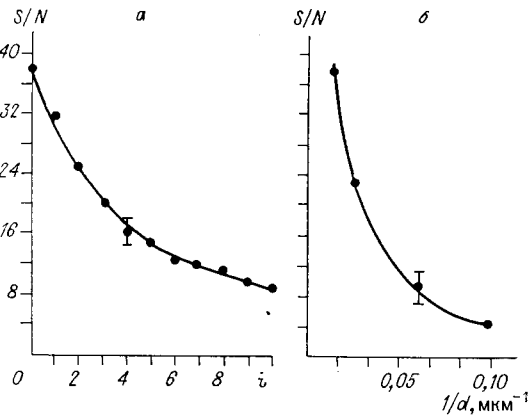
Предельное разрешение оптической схемы оценивалось с помощью функции рассеяния линии [1, 7]. Для получения резкой границы светового поля использовалось лезвие оптического ножа Фуко, неровности которого не превышали 0,5 мкм. Лезвие ножа устанавливалось по диаметру вводимого в волновод светового пучка (см. рис. 1). Измерения проводились на длине волны  $\lambda = 0,63$  мкм с помощью установки ПТУ-53, видикон которой располагался в плоскости изображения, и телевизионного осциллографа С9-1. В результате дифференцирования осциллограммы распределения интенсивности края светового поля были получены ФРЛ для различных мод волновода. Зависимость ее полуширины от эффективного показателя преломления (см. рис. 2) показывает, что с увеличением модового индекса ухудшается качество передачи информации. Как уже отмечалось в [8], это связано с различным распределением по толщине градиентного волновода полей волноводных мод и их эффективных длин волн, благодаря чему случайный набег фаз и затухание [9], возникающие при распространении света по волноводному каналу и через призмные элементы связи, для различных мод оказываются различными.

Ранее отмечалось, что эти же процессы обуславливают шумовые эффекты ОС, формирующие изображение. Для определения отношения сигнал/шум использовались фрагменты миры Фуко, пропускание которых изменялось в направлении  $OY$  (см. рис. 1). Изображение рассматриваемых объектов формировалось с помощью оптической схемы на рис. 1, б. Чтобы избежать ошибки из-за расплывания спектра частот за счет малого количества штрихов и (или) ограниченных размеров светового пучка, в эксперименте использовались фрагменты миры с максимальным количеством штрихов  $M = 16$ , а соотношение размеров пучка и объекта поддерживалось неизменным. В результате количество штрихов, участвующих в формировании изображения, но обладающих различным набором пространственных частот, оставалось постоянным. За величину шума принималось значение интенсивности светового сигнала в изображении темного штриха миры. При формировании изображения различных фрагментов мир на различных модах волновода были получены зависимости ОСШ от индекса моды и  $1/d$  (рис. 3, а, б).

**2. Информационные характеристики волноводных голограмм.** Рассмотрим ВГ, сформированные на составной волноводной структуре (см. рис. 1, а) внешними пучками и в волноводном режиме. Запись осуществлялась светом с длиной волны  $\lambda = 0,51$  мкм.

Оптическая схема записи ВГ волноводными пучками представлена на рис. 4, а. Поскольку в одном из направлений  $OZ$  элементом разрешения выступает мода волновода, то в качестве голографируемых объектов использовались одномерные транспаранты, пропускание которых модулировано в направлении  $OY$ . Запись проводилась на  $TE_0$ -моды. Исполь-

Рис. 3. Величина ОСШ в изображении элементов миры Фуко с различными периодами  $d$  (б), переданных на различных модах волновода  $i$  (а)



зование системы линз  $\text{Л}_1$  и  $\text{Л}_2$ , где  $\text{Л}_1$  — цилиндрическая, позволяло сколлимировать опорный пучок в направлении  $OY$  (см. рис. 1) и тем самым повысить качество воспроизведения ВГ [1], а также сфокусировать пучок в направлении  $OZ$ , благодаря чему возрастает эффективность ввода излучения в волновод. Угол между записывающими пучками  $\Theta/2 = 15,6^\circ$ . После эклонирования и проявления в растворе КОН волноводная ОС возвращалась в первоначальное положение для воспроизведения ВГ.

Формирование ВГ внешними пучками выполнялось по двухлучевой схеме (рис. 4, в). Углы падения опорного и предметного пучков составляли  $70$  и  $10^\circ$  соответственно. Так как геометрия внешних пучков позволяла формировать и затем восстанавливать волноводной модой двумерные объекты независимо от типа используемого волновода [6, 10], то проводилось голографирование одного и того же транспаранта дважды

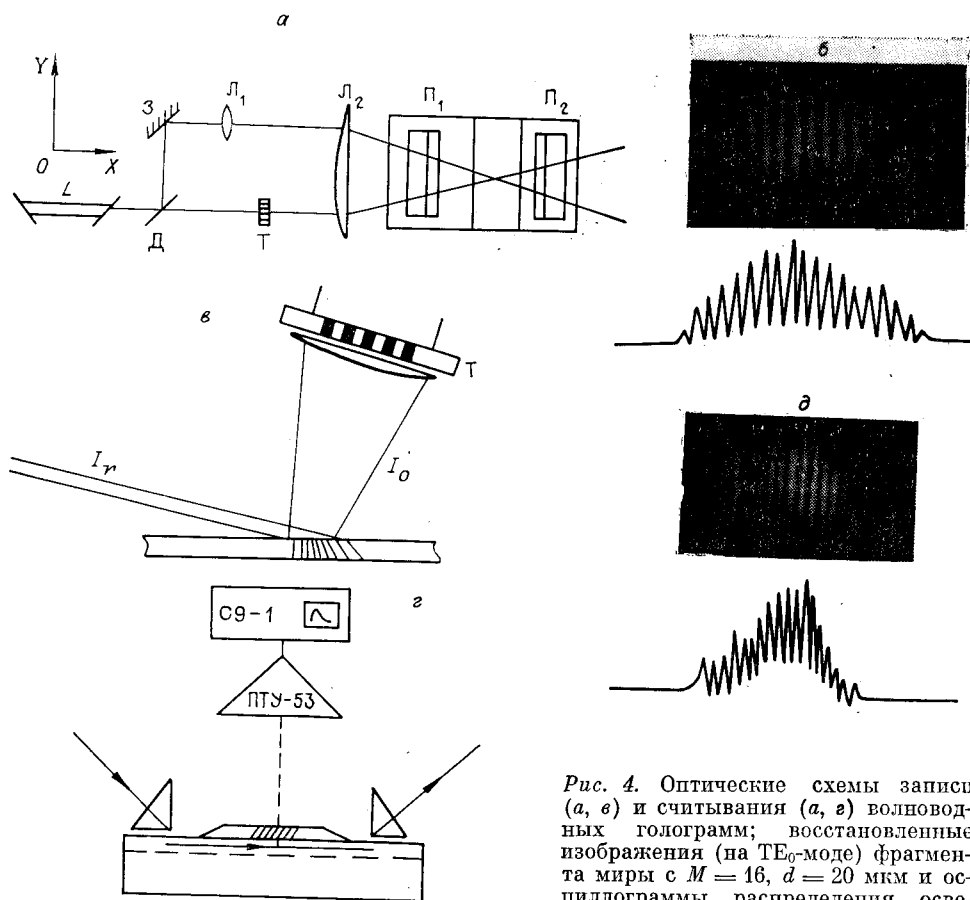


Рис. 4. Оптические схемы записи (а, в) и считывания (а, з) волноводных голограмм; восстановленные изображения (на  $\text{TE}_0$ -моды) фрагмента миры с  $M = 16$ ,  $d = 20$  мкм и осциллограммы распределения освещенности в изображениях (б, д):

$I_r$ ,  $I_o$  — опорный и объектный внешние пучки, Т — голографируемый объект, Д — делительная пластинка, З — зеркало,  $\text{Л}_1$  — цилиндрическая,  $\text{Л}_2$  — сферическая линза,  $\text{П}_1$  и  $\text{П}_2$  — призмы

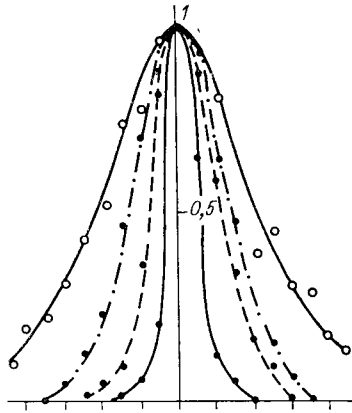


Рис. 5. ФРЛ волноводных голограмм, сформированных волноводными (сплошная линия (○)) и внешними пучками (штриховая линия соответствует вводу информации в объектный пучок в  $OX$ -направлении, штрихпунктирная — в  $OY$ -направлении): сплошной линией (●) изображена ФРЛ волноводного канала основной моды

ды: при вводе информации в предметный пучок в  $OY$ - и  $OX$ -направлениях. Считывание ВГ, оптическая схема которого изображена на рис. 4, г, осуществлялось  $TE_0$ -модой на длине волны  $\lambda = 0,63$  мкм.

Как и в разд. 1, с помощью телевизионной установки и осциллографа с выделением строки оценивались предельное разреше-

ние и ОСШ исследуемых ВГ по методике, описанной в [11].

При дифференцировании пространственного распределения освещенности восстановленного на  $TE_0$ -моды изображения края полуплоскости (лезвия оптического ножа) в плоскости анализа были получены ФРЛ для обеих геометрий записи (рис. 5). На рисунке также приведена ФРЛ волноводного канала с индексом  $i = 0$ . Кривые, изображенные штриховой и штрихпунктирной линиями, соответствуют двум ортогональным положениям лезвия оптического ножа: вдоль осей  $OX$  и  $OY$  (см. рис. 4, в). Экспериментально полученные значения разрешающей способности рассматриваемых ВГ представлены в таблице.

Для определения ОСШ ВГ в схемах записи на рис. 4, а и в в качестве голографируемого объекта использовался фрагмент миры Фуко с количеством штрихов  $M = 16$  и периодом  $d = 20$  мкм. Восстановленные изображения миры и осциллограммы распределения освещенности в изображении приведены на рис. 4, б, д. Для периодических элементов связи волноводных и излучательных мод распределение интенсивности восстановленного пучка, отличное от гауссова распределения, является характерным и вносит дополнительные искажения в передаваемое изображение. Однако подобные абберрационные эффекты могут быть устранены посредством варьирования коэффициента связи вдоль ВГ. Теоретическому рассмотрению этого вопроса посвящена работа [12].

Ухудшение качества изображения объектов, пропускание которых промодулировано в направлении, перпендикулярном направлению считывания, уже отмечалось в [10]. Это связано, по-видимому, с использованием при записи ВГ скользящего опорного пучка с ограниченной апертурой. В результате размер голограммы в направлении считывания  $OX$  оказывается больше, чем в перпендикулярном направлении  $OY$ . Это приводит к тому, что спектр пространственных частот объекта, пропускание которого промодулировано в направлении  $OX$ , регистрируется на голограмме полнее, а следовательно, и качество изображения в этом случае оказывается выше.

**Заключение.** В работе исследовались информационные характеристики оптической системы планарный диффузионный волновод — ТПВ с

ОС	$L$	$A, \text{мкм}^{-1}$	ОСШ	$C \times 10^3, \text{бит}$
Волноводный канал	13,4 мм	0,13	12,38	6,6
ВГ: внешние пучки	8 мм <sup>2</sup>	0,07 <sub>OY</sub> 0,09 <sub>OX</sub>	11,3	182,5
ВГ: волноводные пучки	5,3 мм	0,07	10	1,3

ограничением апертуры, аберрациями и искажениями, вносимыми геометрией записи и параметрами фоточувствительных материалов. Для волноводных ОС существует ряд особенностей, связанных с тем, что свет в волноводе распространяется в виде дискретных мод, отличающихся фазовыми скоростями и распределением поля в волноводе. Так, например, апертуру волноводной ОС можно представить в виде набора щелей, расположение которых друг относительно друга обусловлено профилем показателя преломления волноводной структуры. Продольный размер щелей определяется величиной зоны связи, а ширина каждой щели характеризуется угловым резонансом соответствующего канала (моды) и обусловлена профилем показателя преломления, параметрами волноводящего тракта и элементов ввода-вывода. Отметим, что с увеличением индекса моды возрастает влияние неоднородностей волноводного канала. Однако в большинстве случаев (исключение составляют волноводы с параболическим профилем показателя преломления) передать двумерное изображение не удается в основном в связи с тем, что фазовые скорости мод, участвующих в передаче информации, различны. Пути повышения качества волноводящих систем обсуждались в [13, 14], где предложено исправлять искажения переданного изображения, связанные с различием фазовых скоростей мод, посредством согласованной фильтрации или с помощью нелинейного оптического смешения.

Если для большинства волноводных структур возможно оперирование только одномерными объектами или одной строкой двумерного массива информации, то ВГ, сформированные внешними пучками, позволяют обрабатывать двумерное изображение независимо от типа используемого волновода. В этом случае основной причиной, ухудшающей качество изображения, является искажение гауссова распределения восстановленного пучка [15]. Возможность исправления таких аберраций с помощью объемного голографического фильтра показана в [16].

В заключение отметим, что информативная емкость ВГ, записанных в волноводном режиме, составляет  $\sim 10^3$  бит. Это значение близко к предельному — информативности волноводного канала — и сравнимо с информативными характеристиками традиционных голограмм [6], что позволяет говорить о перспективности развития волноводной голографии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кольер Р., Берхарт К., Лин Л. Оптическая голография.— М.: Мир, 1979.
2. Шульман М. Я. Измерение передаточных функций оптических систем.— М.; Л.: Машиностроение, 1980.
3. Де Велле Дж., Рейнольдс Дж. Голография.— М.: Воениздат, 1970.
4. Юу Ф. Т. С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию.— М.: Сов. радио, 1979.
5. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения.— М.: Мир, 1964.
6. Мировицкий Д. И., Будагян И. Ф., Дубровин В. Ф. Микроволноводная оптика и голография.— М.: Наука, 1983.
7. Clark Jones R. Information capacity of photographic films // JOSA.— 1961.— V. 51, N 11.— P. 1159.
8. Быковский Ю. А., Кульчи Ю. Н., Смирнов В. Л. Исследование ввода одномерного изображения в планарный волновод // Оптика и спектроскопия.— 1981.— Т. 50, вып. 5.
9. Введение в интегральную оптику/Под ред. М. Барноски.— М.: Мир, 1977.
10. Sahara T., Nishihara H., Koyama J. Waveguide holograms: a new approach to hologram integration // Opt. Commun.— 1976.— V. 19, N 3.— P. 353.
11. Буйнов Г. Н., Лукин А. В., Мустафин К. С. Функция рассеяния и качество изображения в голографии // Оптика и спектроскопия.— 1970.— Т. 28, вып. 4.

12. Miyanaga S., Asakura T. Intensity profiles of outgoing beams from tapered grating couplers // Radio Science.— 1982.— V. 17, N 1.— P. 135.
13. Yariv A. On transmission and recovery of three-dimensional image information in optical waveguides // JOSA.— 1976.— V. 66, N 4.— P. 306.
14. Gover A., Lee C. P., Yariv A. Direct transmission of pictorial information in multi-mode optical fibers // Ibid.— P. 302.
15. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы.— М.: Мир, 1980.
16. Быковский Ю. А., Маковкин А. В., Смирнов В. Л. Возбуждение тонкопленочных волноводов голографическим методом // Оптика и спектроскопия.— 1974.— Т. 37, вып. 5.

*Поступила в редакцию 11 августа 1986 г.*

УДК 681.7.06 : 535.12

**М. А. ГОЛУБ, Н. Л. КАЗАНСКИЙ, И. Н. СИСАКЯН,  
В. А. СОЙФЕР**  
*(Куйбышев — Москва)*

### **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПЛОСКОЙ ОПТИКИ**

**Введение.** Синтезированные радиально-симметричные плоские оптические элементы [1] имеют особое значение как непосредственные аналоги линзовой оптики, расширяющие ее возможности.

Для оценки качества работы плоских оптических элементов на этапе проектирования требуется исследовать созданные ими световые поля в заданной области пространства. Такие факторы, как большой объем расчетных данных, значительное число вариантов значений параметров исследуемого светового поля, наличие набора критериев качества, требующая естественности восприятия результатов расчета, выводят решаемую задачу из рамок чисто численных методов, позволяя охарактеризовать ее как вычислительный эксперимент.

Вычислительная модель при исследовании синтезированных оптических элементов [1] должна существенно базироваться на методах теории дифракции [2], даже если расчет фазовых характеристик производился методами геометрической оптики. Дело в том, что, будучи реализованными, плоские оптические элементы имеют столь малую ширину зон, что дифракционные явления играют существенную роль в формировании светового поля. Эффекты дискретизации, связанные с ограниченным разрешением и конечным числом уровней квантования фазы [3], также описываются дифракционными соотношениями. Заметим также, что и для классических оптических элементов, в частности линз, аксиконов, вопросы разрешения, энергетической эффективности, структуры светового поля вблизи фокуса, как известно, могут быть решены лишь в рамках дифракционной модели. Известные методы теории дифракции [2] позволяют детально исследовать световое поле вблизи фокуса линзы. Однако остается открытой проблема создания систематических методов дифракционного расчета распределения светового поля вблизи фокуса для широкого класса радиально-симметричных оптических элементов.

В данной статье предложен численный метод дифракционного расчета тонкой структуры светового поля, созданного плоским оптическим элементом, с учетом эффектов дискретизации. Описан вычислительный эксперимент с фокусирующими элементами плоской оптики, основанный на совместном применении пакета прикладных программ [4], средств визуализации световых полей, средств машинной графики и организации диалога с исследователем. Проанализирована структура светового поля в фокальной области оптического элемента, фокусирующего в кольцо,