

---

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИТЕРАЦИОННОГО РАСЧЕТА И ИССЛЕДОВАНИЯ ДОО

*С.Г. Волотовский, Н.Л. Казанский, В.С. Павельев  
Институт систем обработки изображений РАН*

### *Аннотация*

Описано программное обеспечение для персонального компьютера, предназначенное для итерационного расчета, моделирования и исследования дифракционных оптических элементов.

Приведены результаты вычислительных и натуральных экспериментов по исследованию оптических элементов, рассчитанных с помощью описанного программного обеспечения.

### *Введение*

В настоящее время во всем мире большой научно-практический интерес вызывают работы, посвященные проблемам дифракционной оптики, в частности, разработке методов компьютерного синтеза дифракционных оптических элементов (ДОО), предназначенных для высококачественного формирования заданного светового распределения. ДОО находят широкое применение в оптической фильтрации изображений, построении оптико-волоконных систем связи и гибридных оптико-электронных вычислительных машин, лазерной обработке материалов, решении задач распознавания образов, медицине, военной технике, решении различных научно - исследовательских и учебно-лабораторных задач. Появление компьютерного проектирования ДОО и современных микролитографических технологий открыло новые широкие возможности для расчета и изготовления элементов, обладающих возможностями, недостижимыми в рамках классической оптики [1,2]. Однако, большинство современных практических приложений

предъявляет весьма жесткие требования к качеству формирования заданного светового распределения, выполнить которые сложно из-за отсутствия точного решения обратной задачи теории дифракции. С ростом производительности вычислительной техники широкое распространение приобрел итерационный расчет ДОО благодаря высоким качественным характеристикам элементов, рассчитанных с его помощью [3,4,5,6,7]. Однако, итерационный расчет ДОО требует больших вычислительных затрат. Пересчет комплексного распределения из фокальной плоскости на апертуру и обратно предполагает в общем случае использование двух двумерных БПФ на каждой итерации. Отметим, что для качественного изготовления дифракционного оптического элемента современными методами микролитографии требуется матрица отсчетов фазовой функции размером 2048\*2048 и более [8,9]. Однако, в случае, если элемент обладает радиальной симметрией, расчет ДОО сводится к решению одномерной задачи [5,6]. Данная работа посвящена разработке программного обеспечения для персонального компьютера, позволяющего производить итерационный

расчет ДОЭ, не обладающих радиальной симметрией, для небольшого числа отсчетов (2048\*2048), итерационного расчета радиально-симметричных ДОЭ с количеством отсчетов вдоль радиуса до 10000, а также моделирования и исследования рассчитанных оптических элементов.

### 1. Структура аппаратно-программного комплекса для расчета и исследования ДОЭ на базе IBM PC/AT-486

Основным средством расчета и исследования ДОЭ в ходе выполнения данной работы являлся персональный компьютер типа IBM PC/AT-486. С помощью персонального компьютера осуществлялся итерационный расчет и моделирование ДОЭ, расчет и кодирование фотошаблонов для изготовления ДОЭ методами литографии, контроль микро-рельефа и анализ результатов натурального эксперимента.

Для расчета ДОЭ с помощью итерационных процедур [5,6,7] на языке программирования Borland C++ было написано специальное программное обеспечение (ПО) "DOE-tools". ПО "DOE-tools" включает в себя также функции для моделирования ДОЭ, функции файловой обработки для анализа результатов моделирования и утилиты для кодирования файлов в формат представления данных, необходимый для изготовления ДОЭ методами микро-литографии [8,9]. Аналитический расчет начальных приближений производился с помощью ПО "QUICK-DOE", разработанного в Институте систем обработки изображений Российской академии наук (ИСОИ РАН) [10,11]. На Рис. 1 представлен экран ПО "QUICK-DOE" в момент визуализации амплитудного распределения начального приближения для итерационной процедуры расчета однопучковых моданов.

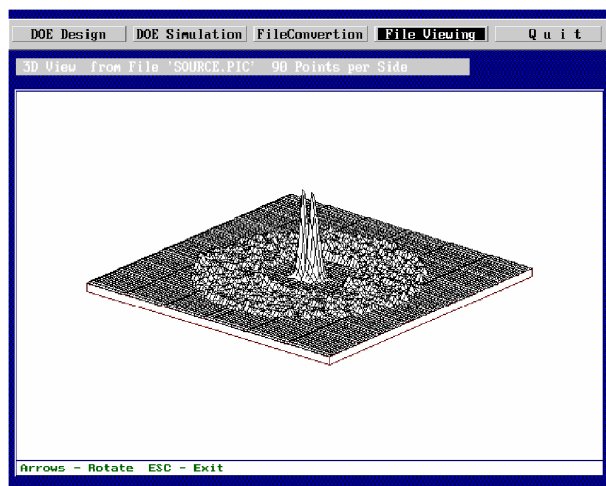


Рис. 1. Экран ПО "QUICK-DOE" в момент визуализации рассчитанного амплитудного распределения начального приближения.

Контроль микро-рельефа синтезированных элементов осуществлялся с помощью микроин-

терферометра MICROMAP-512. Для ввода в компьютер распределений интенсивности, формируемых изготовленным моданом, была использована камера производства фирмы SPIRICON, Inc. (США). Анализ изображений, полученных в натурном эксперименте, осуществлялся с помощью ПО "VIEWSCAN", разработанного в Институте прикладной оптики Университета Фридриха Шиллера (г. Йена, Германия). На Рис. 2 представлен экран ПО "VIEWSCAN" в момент визуализации квазиодномодового распределения интенсивности, полученного в ходе натурального эксперимента.

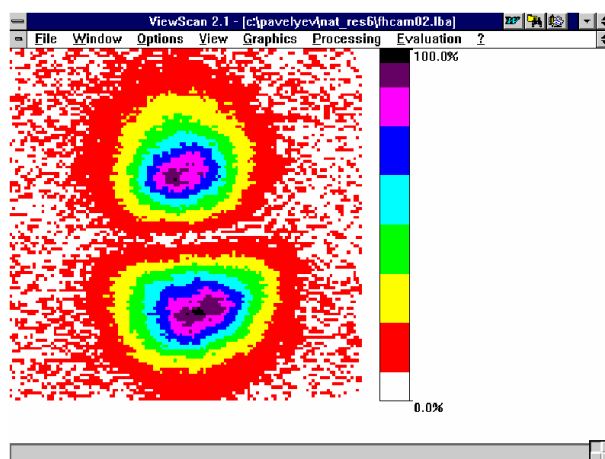


Рис. 2. Экран ПО "VIEWSCAN" в момент визуализации результата натурального эксперимента.

### 2. Программное обеспечение "DOE-tools"

ПО "DOE-tools" предназначено для расчета ДОЭ итерационными процедурами [5,6,7], моделирования рассчитанных ДОЭ, анализа результатов моделирования ДОЭ, подготовки данных для изготовления ДОЭ методами микролитографии [8,9] и специальных преобразований файлов. ПО поддерживает работу с тремя файловыми форматами: .PIC - форматом, разработанным в ИСОИ РАН [10,11]; технологическим бинарным .DAT - форматом, необходимым для изготовления ДОЭ методами микролитографии с помощью литографа ZVA-23 (производство фирмы Jenoptik GMBH, Германия); и .RAD - форматом, используемым для описания одномерных распределений (например в задачах расчета радиально-симметричных ДОЭ). ПО предназначено для работы в операционной системе DOS. ПО состоит из программы DOETOOL и пяти утилит преобразования файловых форматов. ПО поддерживает работу в интерактивном режиме. Имена файлов в диалоге могут задаваться пользователем как с указанием расширения так и без него. ПО имеет защиту от ввода некорректных исходных данных. В случае ввода некорректных исходных данных пользователю выдается соответствующее сообщение. Программа DOETOOL включает в себя возможности для итерационного расчета и моделирования ДОЭ,

анализа результатов моделирования, специальных файловых преобразований и визуализации файлов. Программа DOETOOL имеет трехмерный визуализатор - для .PIC - файлов всех типов [10,11] и одномерный визуализатор для визуализации .RAD - файлов. На Рис. 3 и Рис. 4 представлены, соответственно, экраны программы DOETOOL в моменты трехмерной визуализации расчетного распределения интенсивности, формируемого фокусатором в кольцо, и одномерной визуализации его центрального сечения.

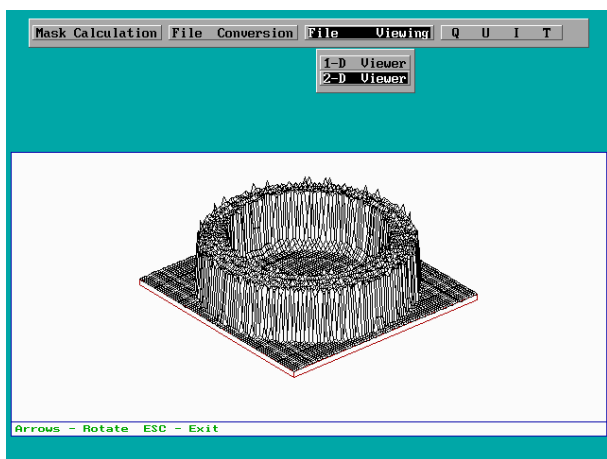


Рис. 3. Экран ПО “DOETOOL” в момент трехмерной визуализации результата вычислительного эксперимента.

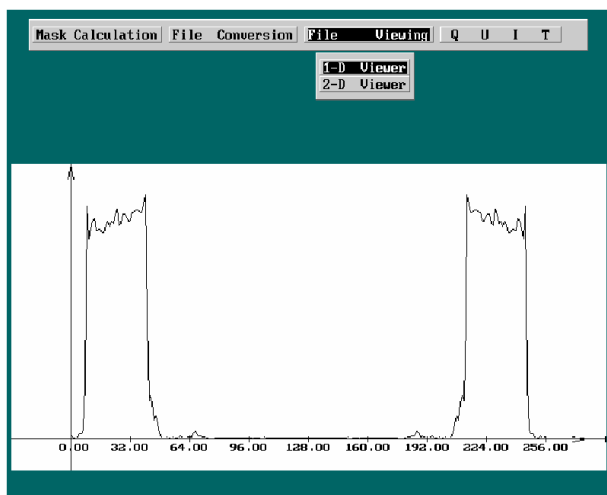


Рис. 4. Экран ПО “DOETOOL” в момент одномерной визуализации результата вычислительного эксперимента.

Для двумерного моделирования ДОО используется процедура вычисления БПФ. Для моделирования элементов, обладающих радиальной симметрией, предусмотрено использование преобразования Ганкеля. На Рис. 5 представлен экран программы DOETOOL в момент работы процедуры БПФ. ПО имеет также возможности для преобразования амплитудного распределения в распределение интенсивности, моделирования работы квантованного

элемента, дополнения исходных файлов нулями, преобразования одномерного .RAD файла в двумерный .PIC - файл, “вырезки” квадратного фрагмента из существующего .PIC-файла и помещения его в другой .PIC-файл, а также “вырезки” из исходного .PIC-файла строки (столбца) и помещения ее (его) в .RAD-файл. Программа DOETOOL имеет многоуровневое графическое пользовательское меню. Для запуска программы DOETOOL необходимо иметь в рабочей директории файл DOETOOL.EXE и файл DOETOOL.MNU, предназначенный для работы с многоуровневым графическим меню.



Рис. 5. Экран ПО “DOETOOL” в момент выполнения процедуры БПФ.

Кроме того, программа DOETOOL требует наличия в рабочей директории файлов VGA.FNT и EGAVGA.BGI для поддержки работы в графическом режиме. Главное меню программы DOETOOL включает в себя следующие пункты: **Mask Calculation**, предназначенный для расчета ДОО итерационными алгоритмами; **File Conversion**, предназначенный для осуществления файловых преобразований; **File Viewing**, предназначенный для одно- и трехмерной визуализации; **Quit** - выход из программы. На нижнем уровне меню пользователь может в интерактивном режиме ввести набор параметров, необходимых для выполнения конкретной операции, и начать ее. Операции файловых преобразований снабжены таймером выполнения. Останов файловых преобразований осуществляется нажатием клавиши ESC. Набор утилит преобразований файловых форматов включает пять программ BYT2BIT.EXE, DAT2PIC.EXE, FLT2BIT.EXE, PIC2DAT.EXE, MONOTON.EXE, выполненных как стандартные .EXE-файлы для работы в системе DOS. Утилиты BYT2BIT.EXE и FLT2BIT.EXE предназначены для преобразования .PIC-файла 8 или 32 типа (байт/отсчет и 4 байта/отсчет), соответственно, в .PIC-файл 1 типа (бит/отсчет), описывающий одну из пяти масок, необходимых для изготовления ДОО методом степенного травления. Утилита PIC2DAT.EXE предназначена для преобразования

бинарного .PIC-файла в бинарный .DAT-файл, необходимый для вывода фотошаблона на литографе ZBA-23. Утилита DAT2PIC.EXE предназначена для восстановления .PIC - файла по набору .DAT-файлов. Утилита MONOTON.EXE позволяет получить по .PIC-файлу 32 типа, описывающему фазовое распределение на апертуре ДОО, набор из пятнадцати .DAT-файлов, необходимый для изготовления ДОО методом равномерного травления по шестнадцати уровням.

### 3. Результаты исследования ДОО

С помощью разработанного ПО производился расчет ДОО, формирующего из Гауссова освещающего пучка He-Ne-лазера распределение, описываемое модой Гаусса-Эрмита (1,0) [7]. Число отсчетов фазовой функции элемента - 2048\*2048. На Рис. 6 приведена двенадцатая бинарная маска из технологического комплекта из пятнадцати масок для формирования рассчитанного фазового рельефа элемента путем равномерного травления резиста ПММА, нанесенного на подложку из кварцевого стекла, по 16 уровням. Комплект бинарных масок получен по рассчитанному полутоновому распределению с помощью утилиты MONOTON.EXE.

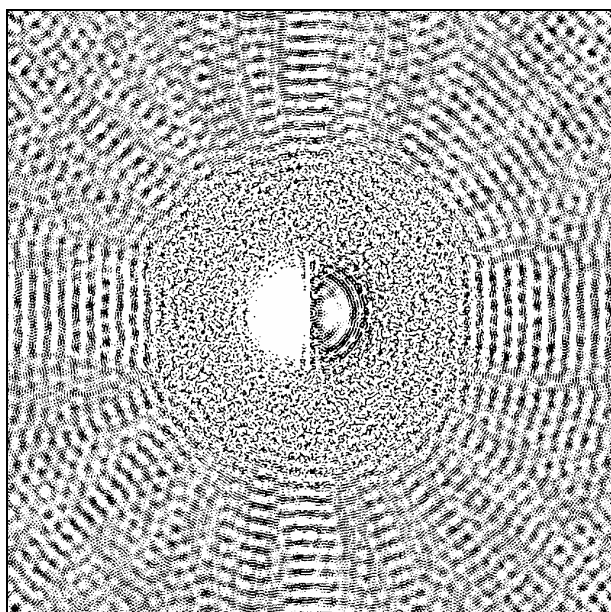


Рис. 6. Центральный фрагмент рассчитанной полутоновой фазовой маски модана (50\*50 пикселей).

Исследование микрорельефа изготовленного однопучкового модана Гаусса-Эрмита проводилось в Институте прикладной физики Университета Фридриха Шиллера. Для исследования полученного фазового микрорельефа был использован микроинтерферометр MICROMAP - 512. В ходе исследования выбирались наиболее характерные участки распределения фазовой функции элемента, квантованной по шестнадцати уровням. Затем проводилось сравнение рас-

считанного фазового распределения и полученного микрорельефа. На Рис. 7 представлен центральный фрагмент рассчитанной полутоновой фазовой маски модана с размерами 50\*50 пикселей, на Рис. 8 - экран ПО "DOETOOL" с графиком сечения данного фрагмента, построенного через центр (один отсчет соответствует 3 мкм). На Рис. 9 - результат профилометрии соответствующего фрагмента изготовленного элемента. "Всплески" на перепадах высоты рельефа (Рис. 9) объясняются наличием интерференционных эффектов. Результат работы изготовленного элемента представлен на Рис. 2.

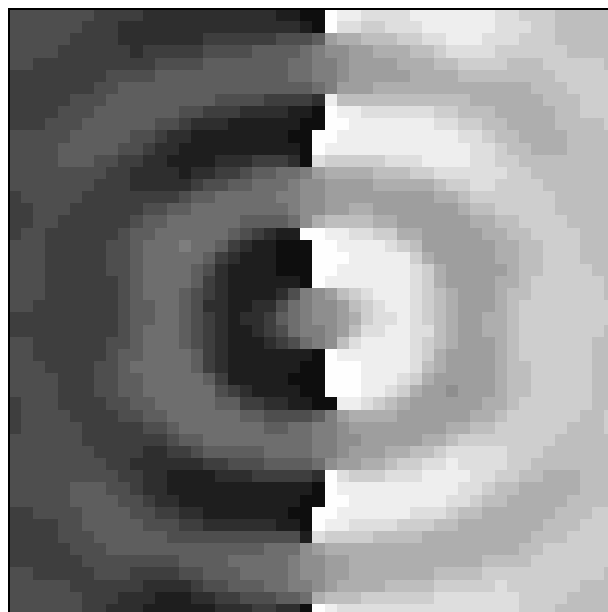


Рис. 7. Экран ПО "DOETOOL" в момент визуализации сечения фрагмента маски модана, представленного на Рис. 6.

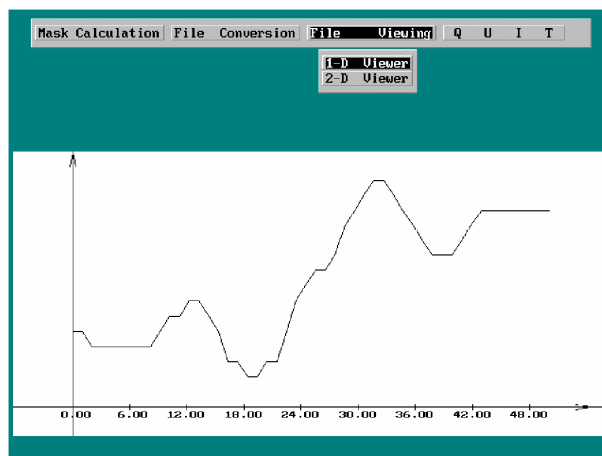
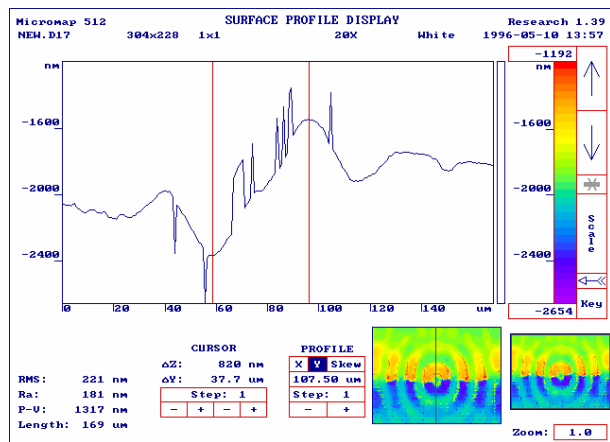


Рис. 8. Результат профилометрии центрального фрагмента изготовленного элемента.

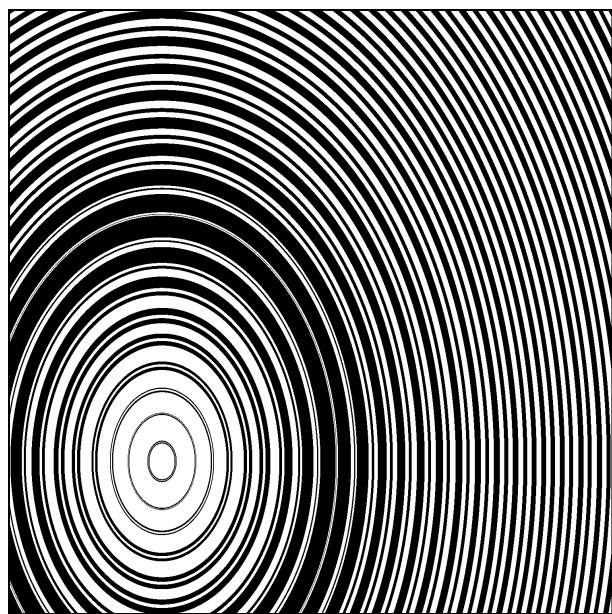
Кроме того, ПО использовалось для расчета технологического фокусатора для CO<sub>2</sub>-лазера, предназначенного для фокусировки Гауссова освещаю-

шего пучка в уширенное кольцо. Такой элемент был рассчитан в ходе 111 итераций работы итерационной процедуры [5,6]. Результаты численного моделирования фокусатора с помощью разработанного ПО приведены на Рис. 3, 4.

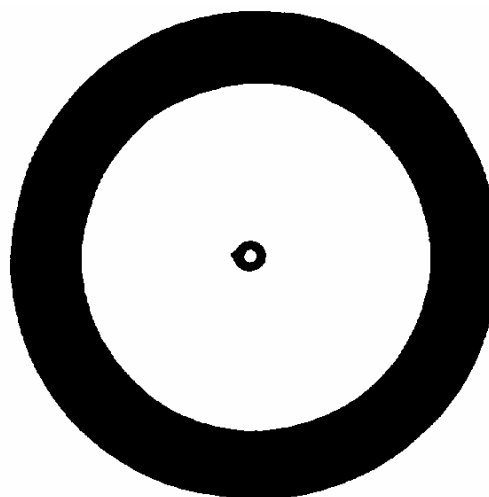


**Рис. 9. Центральный фрагмент третьей бинарной маски из комплекта масок для изготовления фокусатора в уширенное кольцо методом степенного травления.**

На рис. 10 представлен центральный фрагмент третьей бинарной маски из технологического комплекта из четырех масок для формирования рельефа путем степенного травления кварцевого стекла по 16 уровням. На Рис. 11 приведен результат взаимодействия излучения, сфокусированного изготовленным элементом, с термочувствительной бумагой.



**Рис. 10. Центральный фрагмент третьей бинарной маски из технологического комплекта из четырех масок для формирования рельефа путем степенного травления кварцевого стекла по 16 уровням.**



**Рис. 11. Результат взаимодействия излучения CO<sub>2</sub>-лазера, сфокусированного рассчитанным фокусатором в уширенное кольцо, с термочувствительной бумагой**

### **Заключение.**

В данной работе разработано программное обеспечение для итерационного расчета, моделирования и исследования ДОО с помощью персонального компьютера. Результаты исследований подтверждают целесообразность применения данного программного обеспечения в случае, если число отсчетов фазовой функции элемента не превышает 2048\*2048 отсчетов, а в случае если распределение фазы на апертуре ДОО обладает радиальной симметрией - до 10000 отсчетов.

Авторы выражают благодарность А.Г. Храмову и А.В. Устинову за помощь в работе над статьей. Кроме того, авторы выражают благодарность доктору М. Дюпарре и профессору Р. Коваршику, директору Института прикладной оптики (Университет Фридриха Шиллера, Йена, Германия) за полезные предложения по структуре и интерфейсу программного обеспечения.

### **Литература**

1. Сисакян И.Н., Сойфер В.А. Компьютерная оптика. Достижения и проблемы// Компьютерная оптика. -М.:МЦНТИ, 1987.- Вып.1.- С.5-19.
2. Сойфер В.А. Введение в дифракционную микрооптику. - Самара: СГАУ, 1996. - 95с.
3. Wyrowski F. Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blazed phase structures// Journ. Opt. Soc. Amer.- 1990.- Vol.7, N 6- P.961-963.
4. Fienup J.R. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms// Optical Engineering, 1980. - Vol.19. - P.297-303.

5. Soifer V.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Pavelyev V.S. A hybrid method for calculating DOEs focusing into radial focal domain // Proceedings SPIE. 9th Meeting on Optical Engineering in Israel.- Vol.2426.- P. 358-365.
6. Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Павельев В.С., Сойфер В.А. Расчет дифракционных оптических элементов для фокусировки во внеосевые радиальные фокальные области// Автометрия. -1995.- N 1. - С. 114-119.
7. Голуб М.А., Павельев В.С., Сойфер В.А. Построение итерационного алгоритма расчета фазовых дифракционных элементов, формирующих заданное одномодовое распределение на основе применения метода обобщенных проекций// Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 1995.- Вып.14-15.- ч.2 - С.85-93.
8. Berezny A.E., Karpeev S.V., Uspleniev G.V. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography// Optics and Lasers in Engineering.- 1991.-Vol. 15.- P. 331-340.
9. Duparre' M., Golub M.A., Ludge B., Pavelyev V.S., Soifer V.A., Uspleniev G.V., Volotovskii S.G. Investigation of computer-generated diffractive beam shapers for flattening of single-modal CO2-laser beams// Applied Optics. - 1995. - Vol.34, N 14.- P. 2489-2497
10. Волотовский С.Г., Голуб М.А., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л., Павельев В.С., Серафимович П.Г., Сойфер В.А., Харитонов С.И., Царегородцев А.Е. Программное обеспечение по компьютерной оптике// Компьютерная оптика. - М.: МЦНТИ, 1995. - Вып.14-15.- ч.2 .- С. 94-106.
11. Doskolovich L.L., Golub M.A., Kazanskiy N.L., Khramov A.G., Pavelyev V.S., Seraphimovich P.G., Soifer V.A., Volotovskiy S.G. Software on diffractive optics and computer generated holograms// Proceedings SPIE. - 1995. - Vol.2363 "Image Processing and Computer Optics (DIP-94)". - P.278-284.

# Software for iterative calculation and study of DOE

*S.G. Volotovskiy, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev  
Image Processing Systems Institute of RAS*

## **Abstract**

The paper describes software for a personal computer, intended for iterative calculation, simulation and research of diffractive optical elements. The work presents the results of computational and natural experiments on the study of optical elements designed with the described software.

*Citation:* Volotovskiy SG, Kazanskiy NL, Pavelyev VS. Software for iterative calculation and study of DOE. *Computer Optics* 1997; 17: 48-53.

## **References**

- [1] Sisakyan IN, Soifer VA. Achievements and problems. *Computer optics*; Moscow: ICSTI; 1987; 1: 5-19.
- [2] Soifer VA. Introduction to diffractive microoptics. Samara: Samara State Aerospace University; 1996: 95.
- [3] Wyrowski F. Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blazed phase structures//*Journ. Opt. Soc. Amer.*- 1990.- Vol.7, N 6- P.961-963.
- [4] Fienup J.R. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms// *Optical Engineering*, 1980. - Vol.19. -P.297-303.
- [5] Soifer V.A., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Pavelyev V.S. A hybrid method for calculating DOEs focusing into radial focal domain // *Proceedings SPIE. 9th Meeting on Optical Engineering in Israel.*- Vol.2426.- P. 358-365.
- [6] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Pavelyev VS, Soifer VA. The calculation of diffractive optical elements for focusing into off-axis radial focal area. *Avtometriya*; 1995; 1: 114-119.
- [7] Golub MA, Pavelyev VS, Soifer VA. Development of and iterative algorithm for calculating phase diffractive elements forming a single-mode distribution specified on the basis of application of the generalized projections method. *Computer Optics* 1995; 14-15(2): 85-93.
- [8] Berezny A.E., Karpeev S.V., Uspleniev G.V. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography// *Optics and Lasers in Engineering.*- 1991.-Vol. 15.- P. 331-340.
- [9] Duparre' M., Golub M.A., Ludge B., Pavelyev V.S., Soifer V.A., Uspleniev G.V., Volotovskii S.G. Investigation of computer-generated diffractive beam shapers for flattening of single-modal CO<sub>2</sub>-laser beams// *Applied Optics.* - 1995. - Vol.34, N 14.- P. 2489-2497
- [10] Volotovskiy SG, Golub MA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Pavelyev VS, Serafimovich PG, Soifer VA, Kharitonov SI, Tsaregorodtsev AE. Computer optics software. *Computer Optics* 1995; 14-15(2): 94-106.
- [11] Doskolovich L.L., Golub M.A., Kazanskiy N.L., Khramov A.G., Pavelyev V.S., Seraphimovich P.G., Soifer V.A., Volotovskiy S.G. Software on diffractive optics and computer generated holograms// *Proceedings SPIE.* - 1995. - Vol.2363 "Image Processing and Computer Optics (DIP-94)". - P.278-284.