

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОПТИКИ КУМАХОВА

*Изложено современное состояние экспериментальных исследований рентгеновской поликапиллярной оптики (оптики Кумахова). Дано описание созданного автоматизированного стенда, программного обеспечения, методик юстировки и исследования. Приведены результаты определения основных параметров линз Кумахова и поликапилляров в энергетическом диапазоне 5...70 кэВ.*

### ВВЕДЕНИЕ

В оптике Кумахова управление рентгеновским излучением (РИ) осуществляется на основе прохождения РИ через полые трубки – монокапилляры, собранные в пучки различных конфигураций. Прохождение РИ через монокапилляры происходит благодаря полному внешнему отражению от стенок [1, 2].

Основными объектами исследования в экспериментальной поликапиллярной оптике (ПО) являются следующие рентгенооптические системы: рентгеновские линзы (РЛ), полулинзы (РПЛ), конусы (РК), поликапилляры (РПК). РЛ, представляющие из себя пучок РПК, сужающийся к обоим концам, позволяют фокусировать рентгеновское излучение, достигая локальных плотностей потока фотонов рентгеновского излучения сравнимых с синхротронным излучением. РПЛ и РПК применяются для коллимации рентгеновских пучков, позволяя получать углы расходимости выходного излучения на уровне углов полного отражения РИ. Посредством РК можно значительно увеличить рентгеновское излучение.

Помимо изменения направления распространения РИ вышеперечисленные объекты капиллярной оптики обладают избирательной пропускной способностью для различных энергий РИ, что позволяет их использовать в качестве фильтрующих устройств.

Все эти капиллярные устройства управления РИ имеют значительное количество практических применений в различного рода системах в медицине, астрономии, материаловедении и других областях. Для реализации на их основе устройств необходима максимально полная информация об их параметрах. Резкие качественные изменения в характеристиках РЛ произошли буквально в последние несколько лет. В связи с этим возникла ситуация недостаточного развития прежних методик и аппаратуры для исследования поликапиллярной оптики, что повлекло за собой направленность исследований в этом направлении [3, 4]. В то же время эта исследовательская аппаратура служит полигоном для отработки технических приемов и методов измерения параметров, применяемых в технологическом процессе изготовления рентгенооптических поликапиллярных структур.

С целью высокоточного определения параметров рентгенооптических систем и проведения исследований в области поликапиллярной оптики в ИРО был создан автоматизированный оптический стенд. На этом стенде произведены исследования среднефокусных РЛ Кумахова (фокусное расстояние ~ см) и РПК. Определялись трансмиссия, размер фокального пятна и распределение плотности излучения по его площади, фокусное расстояние.

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКИ КУМАХОВА

Количество производимых рентгенооптических систем поликапиллярной оптики в ИРО достигло значительной величины. Прежний подход к определению параметров линз требует больших затрат временных ресурсов. К тому же при этом имеется риск интенсивного облучения персонала в результате внештатных ситуаций (сбои в системе управления рентгеновским источником). Таким образом, очевидна необходимость в максимальной автоматизации процесса измерения параметров поликапиллярной оптики.

Необходимо отметить, что качество поликапиллярных структур постоянно возрастает, в связи с совершенствованием технологии производства. Поэтому требуется и более точный контроль параметров линз. Все это опять таки же требует автоматизированного подхода, по причине ограниченной точности измерений на основе приборов с ручным приводом. Для реализации повышенной точности необходимо использование прецизионного технического оснащения, технических приемов, методов измерений, методов обработки результатов измерения.

Удовлетворить вышеперечисленным требованиям была призвана разработка автоматизированной системы контроля, диагностики и исследования ПО. Система предназначена для точных измерений параметров оптических систем. Измеряемыми параметрами являются: трансмиссия, переднее и заднее фокальные расстояния, распределение интенсивности в фокальном пятне линзы, коэффициент усиления линзы. Также предусматривается возможность определения этих параметров при различных энергиях рентгеновского излучения.

Система создана с применением высокоточного механического и электронного оборудования фирмы Newport. Электронное оснащение и программное обеспечение, позволяющее автоматизировано управлять процессами измерения и обрабатывать результаты измерений для получения на выходе параметров ПО созданы в ИРО.

Помимо чисто технологического звена осуществляющего контроль параметров, разработанная система может удовлетворять и научным требованиям. Научные исследования в области поликапиллярной оптики интенсивно проводятся в ИРО. Разработанная система может выступать в качестве экспериментальной установки в этих исследованиях. Небольшие модификации в структуре и наборе компонентов позволяют исследовать поликапиллярные линзы, поликапилляры, монокапилляры и рентгеновские трубки. Также можно производить широчайший спектр экспериментов с использованием преобразованного с помощью ПО высокоэнергетического излучения, например, фокусированного рентгеновской линзой.

Оптическая схема системы состоит из источника рентгеновского излучения, держателя с рентгенооптическим преобразователем на основе поликапиллярной оптики и блока детектирования (рис. 1).

Система выполняет следующие функции.

1. 3-мерное сканирование пространства перед линзой (перемещение источника излучения): поиск переднего фокуса, максимума пропускания при различном расположении рентгеновской трубки относительно линзы и т.д. Последующее перемещение в найденное положение.

2. 3-мерное сканирование пространства за линзой (перемещение приемника излучения): поиск заднего фокуса, максимума интенсивности при различном расположении детектора относительно линзы, определение размера фокального пятна и распределения в нем интенсивности и т.д.

3. Анализ и представление на экране монитора компьютера необходимых параметров и изображений.

На персональном компьютере (ПК) в составе автоматизированной системы устанавливается интерфейсная программа (ИП), предоставляющая пользователю возможность задавать параметры эксперимента. ПК по RS-интерфейсу соединяется с электронными блоками управления (ЭБУ), которые, обрабатывая команды ИП, подают питающее и управляющее напряжение на управляющие устройства и датчики

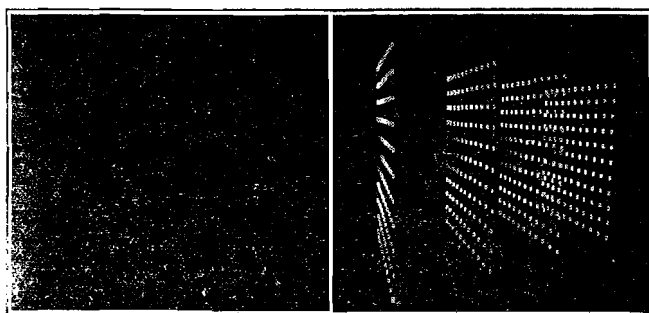


Рис. 1. Профили интенсивности излучения на выходе из линзы в зависимости от расположения источника, полученные при сканировании во время юстировки: объемное представление и представление точками

(двигатели перемещения, блок питания рентгеновского источника, блок детектирования и др.). Сигналы с датчиков также обрабатываются ЭБУ и передаются в ПК, где запоминаются и обрабатываются в соответствии с задачами эксперимента.

При обработке экспериментальных данных важную роль играет наглядность представления информации [5]. При создании системы для исследования ПО стало ясно, что представление результатов эксперимента в наглядной и удобной для экспериментатора форме с использованием алгоритмов трехмерной машинной графики позволяет точнее оценить результаты и правильно определить стратегию дальнейших исследований.

Разработанное программное обеспечение выполняет функции как управления работой экспериментальной установки, так и обработки и интерактивной визуализации результатов. В зависимости от требуемой степени автоматизации эксперимента, программное обеспечение предоставляет экспериментатору возможность осуществлять управление установкой по различным вариантам: прямое дистанционное управление, мониторинг состояния, программное управление, контрольное управление.

Экспериментальные данные представляют собой одно-, двух- или трехмерные массивы значений счета детектора, отражающие изменение интенсивности излучения.

Алгоритмы обработки и визуализации результатов сканирования реализуются как в составе программ управления экспериментальной установкой, так и отдельно.

Визуализация полученных после предварительной обработки массивов, выполняется с использованием библиотеки OpenGL. Модель изображается на экране в соответствии с выбранным вариантом представления.

## ПРОЦЕДУРА ЮСТИРОВКИ

По причине низких значений критического угла, важной проблемой при использовании поликапиллярных структур в составе оптических систем является юстировка [6, 7]. Под юстировкой линзы понимается взаимное совмещение оптических осей входящих в оптическую систему устройств: излучатель, линза, детектор и точное позиционирование в точку, соответствующую максимальной скорости счета на детекторе при постоянном потоке излучения с излучателя.

Нами этот процесс реализован на основе автоматизированного сканирования пространственных областей переднего и заднего фокусов линзы. Использование линейных подвижек и точечного изотропного источника снимает необходимость в точной угловой настройке.

Используя принципы наглядного отображения результатов 3-D визуализацией [5] представлены данные

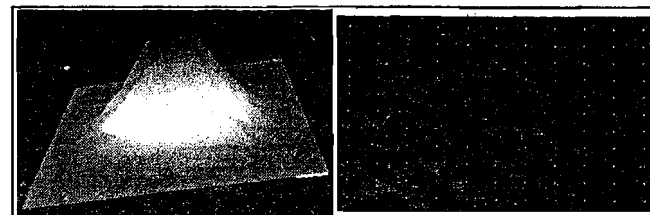


Рис. 2. Профили, полученные при сканировании источником передней фокальной плоскости во время юстировки: объемное представление и представление точками

сканирования источником пространства перед линзой (рисунки 1, 2). В таком же виде представлены некоторые данные, полученные в процессе настройки линзы (рис. 3...5).

Юстировка производится обычно в несколько этапов. 1-й этап – поиск пятна, 2-й этап – поиск максимальной интенсивности. На 1-м этапе пользуются визуализатором и сканированием на большие дистанции и крупным шагом. 2-й этап производится сканированием на меньших дистанциях и с мелким шагом. Достижимая точность настройки на данном стенде (минимальное перемещение с гарантированной точностью) – 1 мкм.

После нахождения фокальных расстояний, производится уточняющее сканирование передней и задней фокальных плоскостей источником и детектором соответственно.

О характере распределения плотности излучения в пространстве на выходе из линзы можно судить по данным, полученным в результате сканирования детектором с установленной на его входном окне диафрагмой. На рис. 3 представлены данные, полученные в результате такого сканирования (с целью юстировки). Размер диафрагмы использовался сравнимый с размером фокусного пятна.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКИ КУМАХОВА

#### Определение трансмиссии РЛ

Трансмиссия линз зависит от энергии, угла захвата, диаметра капилляра, радиуса кривизны капилляра. Для эффективной трансмиссии радиус кривизны каналов должен быть больше, чем критический радиус  $R_{kr} = 4r/\theta_c^2$ , где  $r$  – радиус капилляров линзы,  $\theta_c$  – угол Френеля для данных условий. Очевидно, чем меньше энергия рентгеновского излучения, тем легче выполняется это условие, и захват излучения капиллярами линз более эффективен. С увеличением угла захвата и радиуса кривизны количество отражений увеличивается, соответственно трансмиссия снижается.

Перед измерением линза настраивается описанным выше способом на максимум излучения исследуемого энергетического диапазона. Производится измерение

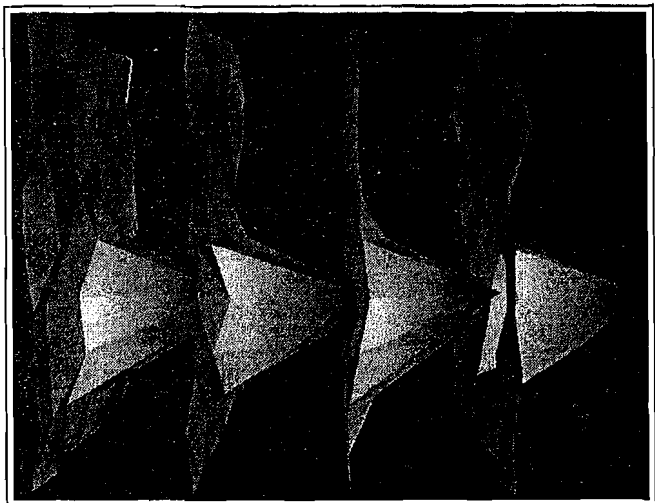


Рис. 3. Результаты сканирования пространства после линзы диафрагмой диаметром, сравнимым с размером фокусного пятна (диафрагма 0,5 мм)

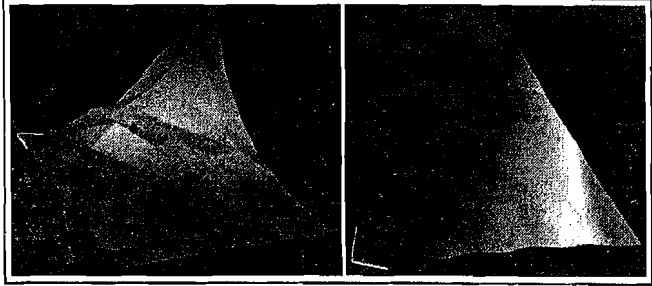


Рис. 4. Последовательное приближение в процессе юстировки сканированием к точке максимального пропускания: объемное представление. 1-й этап: дистанция – 4000 мкм, шаг – 500 мкм; 2-й этап: 2000 мкм, 200 мкм; 3-й этап: 500 мкм, 50 мкм (представлены 1-й и 3-й этапы)

интенсивности этого излучения на выходе линзы. После этого линза удаляется и измеряется интенсивность излучения проникающего в диафрагму, установленную на входе детектора. Размеры отверстия диафрагмы и расстояние между источником излучения и детектором подбираются таким образом, чтобы величина скорости счета детектора была примерно одинакова со скоростью счета при измерении с линзой. Это осуществляется для уменьшения погрешности вследствие нелинейной зависимости скорости счета от загрузки. Из результатов этих измерений с учетом геометрии определяется трансмиссия.

Некоторые результаты представлены в таблице, где  $D_1$  и  $D_2$  – входной и выходной диаметры линзы соответственно,  $F_1$  и  $F_2$  – входное и выходное фокусные расстояния соответственно,  $Q_1$  – угол захвата линзы,  $E$  – энергия рентгеновского излучения,  $Tr_1$  – трансмиссия линзы Кумахова:

№	$D_1$ , мм	$D_2$ , мм	$L$ , мм	$F_1$ , мм	$F_2$ , мм	$Q_1$ , рад	$E$ , кэВ	$Tr_1$ , %
1	5,2	6,7	265	93	178	0,056	К-сер. Ag	22,1
2	4,6	7,0	285	85	208	0,054	К-сер. Ag	28,3
3	5,3	4,3	312	179	85	0,033	30	15,3
4	4,8	5,8	123	160	500	0,030	30	22,2

Использованная методика дает результаты трансмиссии усредненной по всему сечению линзы.

В силу различия в технологии изготовления и геометрии, линзы характеризуются лучшими показателями пропускания на разных энергиях.

Результаты определения зависимости трансмиссии от энергии для некоторых линз представлены на рис. 6. Исследованные линзы изготовлены по технологии для лучшего пропускания энергий близких к К-серии Ag.

#### Определение трансмиссии РПК

Исследован ряд поликапилляров [4], представляющих из себя сборку монокапилляров диаметром  $d=2$  мкм, радиусом изгиба  $R=5$  м, длиной  $l=100$  мм, диаметр

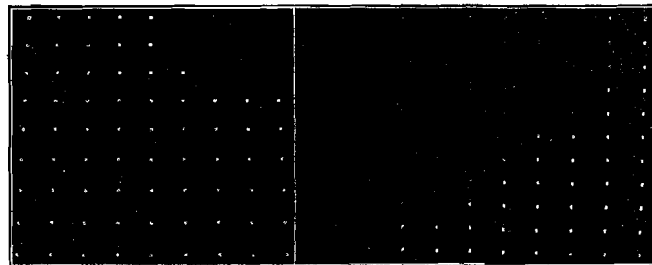


Рис. 5. То же, что на рис. 4 – представление точками

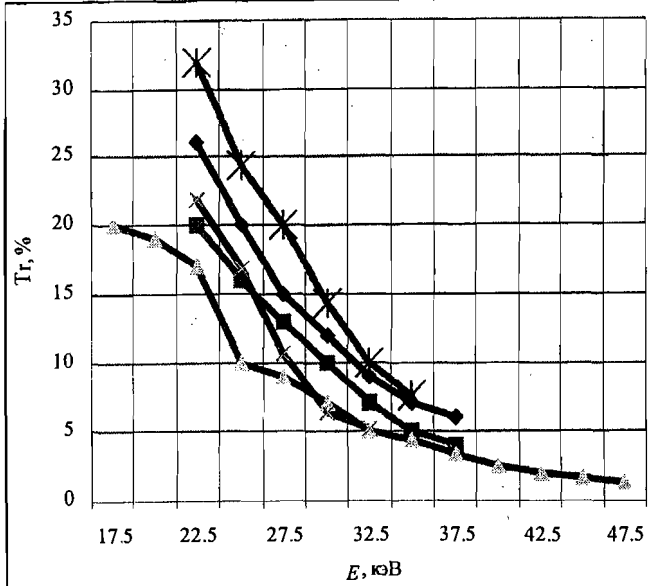


Рис. 6. Зависимость трансмиссии некоторых линз от энергии рентгеновского излучения

всей сборки – 1 мм. Экспериментальные данные значений трансмиссии для некоторых капилляров представлены в таблице:

Е, кэВ/№	1	2	3	4	5	6	7	8
30	45,8	39,6	45,9	40,8	40,7	36,0	33,0	33,0
50	17,4	15,9	17,3	16,3	11,1	12,9	13,2	10,2
60	9,4	8,2	10,0	10,9	5,7	6,2	8,5	5,3
70	6,9	7,8	5,9	6,7	3,8	3,7	5,1	3,9

Видно, что исследованные поликапилляры, по причине малости диаметра входного отверстия, отличаются хорошими показателями пропускания на высоких энергиях.

*Распределение интенсивности в фокусном пятне линзы, фокусное расстояние и размер фокусного пятна*

Теоретически радиус фокусного пятна можно описать следующим уравнением:  $D=2r+f\theta_c$ . Или, пренебрегая размером капилляра,  $D \approx f\theta_c \approx 1/E$ . Откуда следует, что размер фокусного пятна обратно пропорционален энергии фокусируемого излучения.

Распределение интенсивности РИ в пространстве заднего фокуса (на выходе линзы) определялось посредством сканирования детектором с закрепленным на его входном отверстии устройством формирования потока радиации. В качестве таких устройств использовались нож, щель, угол и диафрагма. Размер фокального пятна, т.е. минимальное значение сечения пучка РИ на выходе из линзы, а также изменение сечения рентгеновского пучка вдоль оптической оси определялись в процессе обработки полученных в результате сканирования данных. Пример оценки размера фокусного пятна методом шторки представлен на рис. 7.

С помощью шторки производилось сканирование в различных точках оптической оси и определялись поперечные размеры рентгеновского пучка. Расстояние от выходного конца линзы до точки с наименьшим размером фокусного пятна составляет заднее фокусное расстояние линзы.

Проведя дифференцирование полученной зависимости, и измерив ширину кривой на половине высоты, мы сможем оценить размер фокусного пятна.

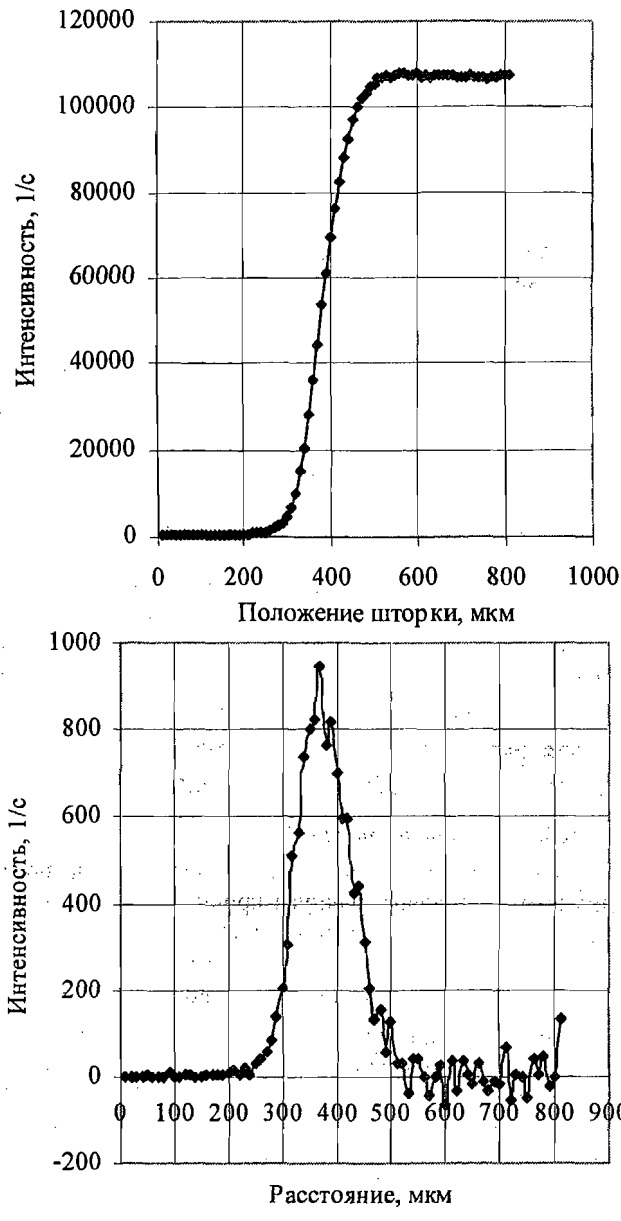


Рис. 7. Распределение интенсивности в пятне полученное при сканировании и результат дифференцирования экспериментальной кривой

Оценить размер фокусного пятна линзы можно также с помощью визуализатора. На рис. 9 представлено изображение фокусного пятна, полученное этим методом для той же линзы.

В настоящее время существуют линзы фокусирующие излучение с анода рентгеновской трубки в пятно диаметром до 30 мкм и дающие усиление до 1000 раз.

Точное определение распределения интенсивности излучения в пятне производится посредством сканирования фокальной плоскости, как и в методике определения размеров пятна. При этом предъявляются особые требования к точности используемого оборудования.

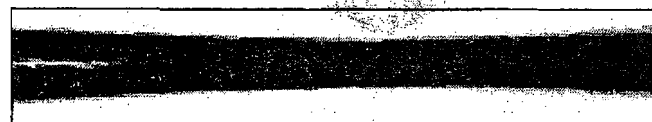


Рис. 8. Результаты визуализации сканирования пространства после линзы щелью размером 50 мкм на дистанции 4000 мкм

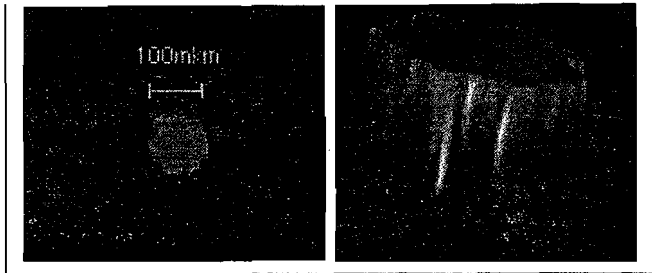


Рис. 9. Изображение фокусного пятна линзы и его объемное представление

Требуется высокоточное перемещение подвижек на микронные расстояния и субмикронная точность исполнения формирующих поток радиации устройств.

Оценка распределения интенсивности производится также посредством визуализатора (рис. 9). На рис. 10 представлено распределение интенсивности на выходе из линзы, полученное с помощью визуализатора. А также, выполнено преобразование этого плоскостного изображения в 3-мерное.

На рис. 10 хорошо отражается внутренняя структура линзы. И дается наглядное представление о поле излучения.

Эта методика не позволяет получить точную картину распределения в силу нелинейных искажений на различных трактах визуализации (видеокарта компьютера, видеокамера и др.). Но, тем не менее, ее использование целесообразно для экспрессной оценки размера пятна и распределения интенсивности в пятне.

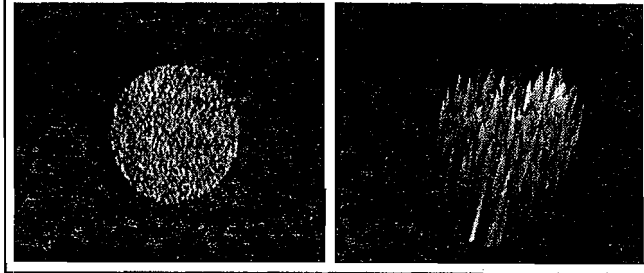


Рис. 10. Распределение интенсивности на выходе из линзы, полученное с помощью визуализатора и 3-мерное преобразование изображения

Авторы благодарят М.А. Кумахова, В.П. Петухова за ценные замечания, А.А. Маркелова за помощь в изготовлении программного обеспечения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аркадьев В.А., Коломийцев А.И., Кумахов М.А. и др. / УФН, 1989. Т.5.
2. Kutakhov M.A., Komarov F.F. / Phys. Rep. 1990. Vol.191.
3. Бровченко В.Г., Кириченко А.М., Молчанов А.Д. и др. / Сб. тр. «Межд. шк.-сем. по компьютерной автоматизации и информатизации», ACS, 2002.
4. Chertov Y.P. / Proc.SPIE, 2002. Vol. 4765.
5. Markelov A.A. / Proc.SPIE, 2002. Vol. 4765.
6. Cappuccio G., Dabagov S.B. / Proc.SPIE, 2000. Vol. 4155.
7. Cappuccio G., Dabagov S.B. / Proc.SPIE, 2002. Vol. 4765.



Международная Байкальская молодежная  
научная школа по фундаментальной физике  
« Взаимодействие полей и излучения с веществом »  
VII-ая конференция молодых ученых  
г. Иркутск, 13–18 сентября 2004 г.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутский государственный университет,  
Физический факультет МГУ и Московский физико-технический институт  
проводят с 13 по 18 сентября 2004 г. в Иркутске  
Международную байкальскую молодежную научную школу  
по фундаментальной физике (БШФФ–2004).

Тема Школы 2004 г.: « Взаимодействие полей и излучения с веществом ».

В рамках БШФФ–2004 традиционно состоится VII-ая конференция молодых ученых.

На конференции предполагается обсудить доклады по следующим направлениям:

- Дистанционное зондирование околоземного космического пространства
- Солнечное излучение и межпланетная среда
- Взаимодействие излучения с конденсированными средами

<http://bsfp.iszf.irk.ru>

