

*На правах рукописи*

**МИКУЛИЧ Алексей Владимирович**

**УДК 519.6+681.7.015.2**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ  
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ЛИНЗ  
(01.01.07 — вычислительная математика)**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Работа выполнена в Университете дружбы народов имени Патриса Лумумбы.

**Научные руководители:**

доктор физико-математических наук, профессор  
Е. П. Жидков,  
кандидат физико-математических наук, доцент  
В. В. Курышкин.

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук Е. А. Гребеников,  
кандидат физико-математических наук А. Н. Половинкин.

Ведущая организация — Центральное конструкторское бюро уникального приборостроения АН СССР.

Защита диссертации состоится «20» апр. 1989 г. в 13 час. 00 мин. на заседании специализированного совета Д 047.01.04 при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований по адресу: город Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «20» марта 1989 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета Д 047.01.04  
кандидат физико-математических наук

*Иванченко*  
З. М. ИВАНЧЕНКО

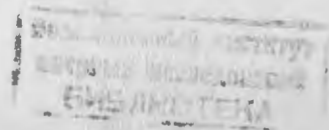
**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Актуальность темы.

Появление оптических квантовых генераторов и тонких (порядка нескольких длин световых волн) волноводных пленок привело к формированию в конце шестидесятых годов нового научно-технического направления — оптоэлектроники. Оптоэлектроника, называемая также интегральной или планарной оптикой, занимается изучением электромагнитных явлений, происходящих при распространении света в тонких слоях прозрачных материалов, а также конструированием тонкопленочных волноводов с желаемыми свойствами. Широко распространенным классом элементов интегрально-оптических устройств является класс тонкопленочных волноводных линз (ТВЛ), назначение которых состоит в фокусировке световой волны, распространяющейся вдоль волноводного слоя. На основе ТВЛ может быть создан спектральный анализатор, работающий практически со скоростью набегающего анализируемого сигнала /1/.

В ТВЛ лонберговского типа эффект фокусировки может быть обеспечен за счет изготовления волноводного слоя со специальным распределением толщины /2/. Фокусирующие свойства сильно зависят от степени соответствия изготовленного покрытия требуемым характеристикам. Точный количественный контроль фокусирующих свойств ТВЛ необходим для создания высококачественных безабберационных линз. Существует необходимость не просто в точном контроле, а в диагностике, т.е. таком контроле, который, во-первых, является неразрушающим (исследуемый образец сохраняет свои свойства после проведения диагностики), и во-вторых, позволяет по данным измерений не только ответить на вопрос, обладает или нет произведенный образец заданными свойствами оптической системы, но и выяснить, насколько и почему не удовлетворяет. Технологическая цель диагностики — подсказать, какие изменения следует внести в процесс изготовления ТВЛ для доведения образца.

Традиционные методы диагностики: прямое профилометрирование (измерение физической толщины волноводного слоя в центральном сечении линзы), профилоинтерферометрия (измерение оптической толщины волноводного слоя в центральном сечении линзы), интерферометрия (измерение оптической толщины волноводного слоя в области утолщения), — обладают рядом недостатков, основ-



ным из которых является неудовлетворительная для нужд интегральной оптики точность восстановления оптических характеристик планарных линз по данным измерений.

Поэтому актуальной является задача разработки новых способов диагностики, не связанных с измерением толщин, а также соответствующих им математических моделей /3/ и программно-математического обеспечения /4/. Искомые способы диагностики непременно должны быть неразрушающими и позволить в перспективе включить их непосредственно в технологическую цепочку для управления процессом формирования ТВЛ.

Изучение одного из таких способов диагностики, основанного на анализе видимых траекторий световых лучей в изучаемой ТВЛ, и составляет основное содержание данной диссертации.

#### Цель работы.

Общая цель работы заключается в построении математической модели неразрушающей диагностики тонкопленочных волноводных линз (планарных линз) по следам лучей, проходящих через планарную линзу, и создании комплекса программ, реализующего данный метод диагностики. Это конкретизируется в следующих пунктах:

1. Математическая постановка обратной задачи восстановления характеристик ТВЛ по следам лучей зондирующего пучка в планарной линзе.
2. Разработка регуляризованных методов решения обратных задач диагностики ТВЛ по данным о следах зондирующих лучей и алгоритмизация этих методов.
3. Разработка комплекса программ для диагностики ТВЛ названным способом.
4. Исследование разработанного способа диагностики методом вычислительного эксперимента для выяснения границ его применимости и формулировки рекомендаций по методике получения данных о следах зондирующих лучей в ТВЛ.

#### Научная новизна.

В рамках концепции вычислительной диагностики /5/ (нового направления прикладной математики, синтезирующего возможности вычислительной математики и измерительной аппаратуры для создания комплексов "Регистрирующее устройство + ЭВМ = Новый прибор") в данной диссертации разработан новый метод диагностики ТВЛ,

основанный на анализе видимых траекторий световых лучей в изучаемой ТВЛ.

Комплекс измерений, проводимый в предложенном способе диагностики ТВЛ, можно назвать лучевым тестом ТВЛ. Лучевой тест для ТВЛ заключается в следующем: вдоль волноводного слоя пропускается семейство параллельных на входе зондирующих лучей — узких лазерных пучков. В однородном тонкопленочном волноводе свет распространяется вдоль волноводного слоя без искажений. В той части волновода, где имеется локальная неоднородность в толщине волноводной пленки, лучи света искривляются (рис. 1). Наличие в волноводной пленке мелкозернистых неоднородностей размером порядка длины волны света, используемого для зондирования, приводит к тому, что часть света рассеивается в пространство над волноводом и лучи становятся видимыми сверху. Следы лучей можно фотографировать или зарегистрировать с помощью ПЭС матрицы (с постоянной зарядовой связью). Координаты точек лучей можно оцифровать и дальнейшую обработку проводить с помощью ЭВМ.

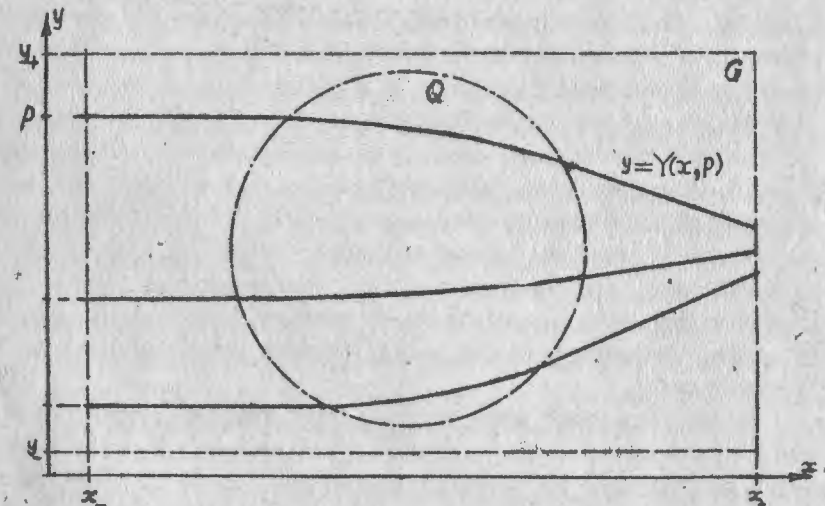


Рис. 1. Прохождение зондирующих лучей в диагностируемой области  $G = [x_1, x_2] \times [y_1, y_2]$  планарной линзы. Область неоднородности  $Q$  содержится в  $G$ . Внутри  $Q$  лучи искривляются. Вне  $Q$  лучи прямые.

В диссертации разработана математическая модель диагностики ТВЛ названным способом и создан комплекс прикладного программно-математического обеспечения для диагностики круговых ТВЛ по дискретным данным о следах зондирующих лучей.

#### Практическая ценность.

Комплекс прикладного программно-математического обеспечения для диагностики круговых ТВЛ по дискретным данным о следах лучей реализован на стандартном алгоритмическом языке фортран-IV, что позволяет проводить расчеты на различных ЭВМ, в частности ЭВМ серий ЕС и СМ. Комплекс внедрен на ЕЦ Университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы (ЭВМ ЕС-1055М) и используется для обработки экспериментальных данных с 1986 года.

Возможно использование созданного программно-математического обеспечения на универсальной ЭВМ, сопряженной с измерительным комплексом. В этом случае разработанный метод вычислительной диагностики может служить средством оперативного неразрушающего контроля тонкопленочных волноводных линз в процессе их изготовления.

Разработанный метод диагностики одинаково пригоден для планарных линз трех существующих типов: во-первых, - для тонкопленочных волноводных линз лонберговского типа, для которых он собственно и разрабатывался (в планарных линзах этого типа искривление лучей и их фокусировка достигается за счет изменения толщины волноводного слоя на плоской подложке); во-вторых, - для градиентных линз, фокусирующие свойства которых обеспечиваются за счет химической неоднородности волноводного слоя постоянной толщины на плоской подложке; в-третьих, для геодезических линз, в которых фокусировка достигается за счет искривления поверхности с однородным по толщине и химическому составу слоем волноводной пленки, вдоль которой распространяется световая волна.

Дополнительным преимуществом разработанного способа диагностики планарных линз по следам лучей является то, что в отличие от традиционных способов диагностики он не требует применения дорогостоящей аппаратуры для проведения измерений.

#### Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах, перечень которых приведен в конце автореферата.

#### Апробации.

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедр теоретической физики и радиофизики Университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы (Москва), Лаборатории вычислительной техники и автоматизации (Дубна), кафедры вычислительной математики Волгоградского Государственного Университета (Волгоград), на VIII-XI Конференциях молодых ученых Университета дружбы народов имени П. Лумумбы (1985-1988), на 21-24 Научных конференциях факультета физико-математических и естественных наук Университета дружбы народов (1985-1988), на Всесоюзной школе-семинаре по некорректно поставленным задачам (Саратов, 1985), на I Всесоюзной конференции "Вычислительная физика и математическое моделирование" (Волгоград, 1988).

#### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, включающих в себя четырнадцать параграфов, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации - 135 страниц. Список литературы включает в себя 88 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель работы и дается схема изложения результатов диссертации.

В первой главе дан обзор физических результатов, необходимых для описания распространения света в слабонеоднородных тонкопленочных волноводах. Сделаю переход к модели, в которой ТВЛ представляется плоской оптической средой с некоторым коэффициентом преломления  $n_{\text{эф}}(x, y)$ , зависящим от точки плоскости. Далее доказано, что основной характеристикой фокусирующих свойств ТВЛ является распределение коэффициента замедления (РКЗ), называемого также приведенным коэффициентом преломления  $1/2$ . Дана математическая постановка задачи восстановления распределения коэффициента замедления по следам лучей зондирующего пучка.

В § 1.1 дано описание однородных и слабонеоднородных тонкопленочных волноводов. Показано, как делается переход  $1/6$  от математического описания распространения электромагнитных волн

вдоль слабонеоднородных тонкопленочных волноводов как объемных тел к модели тонкопленочного волновода как плоскости или части плоскости с некоторым распределением эффективного показателя преломления  $n_{\text{эф}}(x, y)$ , являющегося функцией точки плоскости и характеризующего переменную скорость распространения света вдоль плоскости волновода.

В § 1.2. введено понятие планарной линзы как плоской оптической среды с распределением эффективного показателя преломления специального вида. При этом мы абстрагировались от волновых процессов в поперечном сечении тонкой пленки волноводного вещества, так как для фокусирующих свойств планарной линзы не существенно, каким именно физическим способом реализовано изменение эффективного показателя преломления. Пользуясь тем, что распределение эффективного показателя преломления планарной линзы имеет постоянное значение  $n_0$  вне некоторой ограниченной области  $Q$ , вводится отношение  $n(x, y) = n_{\text{эф}}(x, y) / n_0$ . Величина  $n(x, y)$  показывает, во сколько раз скорость распространения света вдоль волновода в точке  $(x, y)$  меньше скорости распространения света вне области неоднородности  $Q$ . Функция  $n(x, y)$  называется распределением коэффициента замедления (РКЗ) планарной линзы. РКЗ является основной характеристикой планарной линзы, так как именно РКЗ характеризует фокусирующие свойства планарной линзы.

В § 1.3 проведен краткий анализ проблем численной обработки и физической интерпретации измерений при традиционных способах диагностики тонкопленочных волноводных линз. Указаны основные факторы, снижающие точность восстановления распределения коэффициента замедления ТВД с помощью традиционных способов. Показаны принципиальные трудности улучшения традиционных способов диагностики, вызванные расчетом распределения коэффициента замедления по измеряемым оптической или физической толщинам.

В 1.4 на основе классических результатов дифференциальной геометрии и вариационного исчисления [7] проведен анализ прямой задачи распространения световых лучей в планарной линзе с известным распределением эффективного показателя преломления  $n_{\text{эф}}(x, y)$ .

Если система координат  $Oxy$  выбрана так, что ось  $Ox$  направлена вдоль оптической оси планарной линзы, то проходящие через

область  $G = [x_-, x_+] \times [y_-, y_+]$  лучи однозначно проектируются на ось  $Ox$  и их следы, как кривые в  $G$ , могут быть параметризованы координатой  $x$ . Функция  $y = y(x)$ , описывающая след луча, является решением задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения:

$$-y_x(x) \frac{\partial n_{\text{эф}}(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial n_{\text{эф}}(x, y)}{\partial y} = \frac{y_{xx}(x)}{1 + y_x^2(x)} n_{\text{эф}}(x, y) \quad (1)$$

с начальными условиями, задаваемыми на входе в линзу:

$$y(x_-) = p, \quad y'(x_-) = y_x(x_-) = V_0. \quad (2)$$

Пользуясь тем, что для всех точек  $n_{\text{эф}}(x, y) \geq n_0 > 0$ , разделим (1) на  $n_{\text{эф}}(x, y)$  и перейдем к эквивалентному уравнению

$$-y_x \omega_x(x, y) + \omega_y(x, y) = \frac{y_{xx}(x)}{1 + y_x^2(x)}, \quad (3)$$

где коэффициенты в левой части являются логарифмическими производными от  $n_{\text{эф}}(x, y)$ :

$$\omega_x(x, y) = \frac{\frac{\partial}{\partial x} n_{\text{эф}}(x, y)}{n_{\text{эф}}(x, y)}, \quad \omega_y(x, y) = \frac{\frac{\partial}{\partial y} n_{\text{эф}}(x, y)}{n_{\text{эф}}(x, y)}, \quad (4)$$

т.е. суть частные производные логарифма распределения эффективного коэффициента преломления  $n_{\text{эф}}(x, y)$ .

Логарифмические производные двух распределений эффективного показателя преломления, различающихся постоянным положительным множителем, тождественно равны между собой и соответствующим логарифмическим производным общего для них РКЗ. Так как коэффициенты уравнений для лучей, параметризованных координатой  $x$ , зависят только от логарифмических производных распределений эффективного показателя преломления, то справедливы

**Предложение.** Для всех планарных линз, имеющих одинаковое распределение коэффициента замедления  $n(x, y)$ , лучи, параметризованные координатой  $x$  и имеющие одинаковые начальные условия, совпадают.

**Следствие.** Фокусирующие свойства планарной линзы определяются распределением коэффициента замедления  $n(x, y)$  и одинако-

вы для планарных линз, у которых распределение эффективного показателя преломления пропорционально  $n(x, y)$ .

В § 1.5 дана математическая постановка обратной задачи восстановления РКЗ планарной линзы по следам зондирующих лучей (по данным лучевого теста) и показано, что задача восстановления РКЗ планарной линзы по данным лучевого теста эквивалентна задаче восстановления скалярной метрики островного типа по форме ее геодезических, покрывающих анализируемую область.

Пусть исследуемая область  $G = [x_-, x_+] \times [y_-, y_+]$  планарной линзы целиком содержит область неоднородности  $Q$  линзы (рис. I). Пусть  $Y(x) = Y(x, p)$  обозначает параметризованный координатой  $x$  луч, вышедший из точки  $(x, p)$ ,  $y_- \leq p \leq y_+$ , в положительном направлении оси  $Ox$ . Семейство кривых

$$\{ ([x_-, x_+] \rightarrow Y(x, p), Y_x(x, p)|_{x=x_-} = 0) : y_- \leq p \leq y_+ \} \quad (5)$$

называется пучком лучей, параметризованных координатой  $x$ . В нашем случае удобно называть (5) зондирующим пучком лучей, а  $p$  — прицельным параметром луча  $Y(x, p)$ ,  $x_- < x \leq x_+$ , из пучка (5). В начальных точках  $(x_-, p)$  лучей направления всех лучей совпадают.

Про зондирующий пучок (5) дополнительно известно, что, во-первых, крайние его лучи проходят мимо области неоднородности и не искривляются:

$$Y(x, y_-) = y_-, \quad Y(x, y_+) = y_+ \quad \text{для всех } x: x_- \leq x \leq x_+; \quad (6)$$

во-вторых, для любого прицельного параметра  $p$ ,  $y_- \leq p \leq y_+$ , все точки  $(x, Y(x, p))$  зондирующих лучей лежат внутри области  $G$  (все значения  $Y(x, p)$  лежат в интервале  $]y_-, y_+[$  для  $x$  из интервала  $[x_-, x_+]$ );

в-третьих, для каждого зондирующего луча  $[x_-, x_+] \rightarrow (x, Y(x, p))$  в точке  $(x_+, Y(x_+, p))$  его пересечения с правой границей прямоугольной области  $G$  и в некоторой ее окрестности выполняется

$$Y_{xx}(x, p) = 0. \quad (8)$$

Обратная задача формулируется следующим образом:

по известному пучку лучей (5), удовлетворяющему условиям (6), (7), (8); восстановить неизвестное распределение коэффициента замедления в области  $G$ .

Во второй главе проанализирована обратная задача и разработаны регуляризованные методы ее решения.

В § 2.1 задача восстановления РКЗ планарной линзы по пучку зондирующих лучей без фокальных точек в области восстановления сводится к решению задачи Коши для уравнения переноса и проводится исследование поставленной задачи Коши.

В предположении, что для каждого фиксированного  $p$  луч  $y = Y(x, p)$  дважды непрерывно дифференцируем по параметру  $x$ , из (6), (8) следует, что на периметре  $\partial G$  области  $G$  РКЗ равно единице:

$$n(x, y)|_{\partial G} = 1, \quad (9)$$

что эквивалентно равенству

$$w(x, y)|_{\partial G} = 0 \quad (10)$$

для логарифма РКЗ. Дополнительно предполагается, что — никакие два различных луча зондирующего пучка не пересекаются между собой внутри  $G$ , т.е. зондирующий пучок лучей (5) не имеет в  $G$  фокальных точек,

— пучок зондирующих лучей (5) гладко зависит от параметра  $p$  в том смысле, что функция

$$[Y]: G \rightarrow G, \quad (x, p) \mapsto (x, Y(x, p)) \quad (12)$$

непрерывно дифференцируема по второму аргументу (прицельному параметру). В сделанных предположениях доказана

**Теорема.** Для зондирующего пучка лучей (5) задача восстановления РКЗ сводится к решению задачи Коши для квазилинейного дифференциального уравнения в частных производных (называемого уравнением переноса)

$$a(x, y)w_x + b(x, y)w_y = c(x, y), \quad (x, y) \in G, \quad (13)$$

$$w(x, y) = 0, \quad (x, y) \in \partial G \quad (14)$$

относительно неизвестного логарифма РКЗ  $w(x, y)$ . Коэффициенты уравнения (13) выражаются через частные производные по  $x$  функции  $Y(x, p)$  по формулам:

$$\left. \begin{aligned} a(x, y) &= -Y_x(x, p)|_{p=P(x, y)} \\ b(x, y) &= 1, \\ c(x, y) &= \frac{Y_{xx}(x, p)}{1 + Y_x^2(x, p)} \Big|_{p=P(x, y)} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где  $P(x, y)$  – прицельный параметр (единственного) луча из зондирующего пучка, который проходит через точку  $(x, y)$ .

Так как экспериментально измеряются только координаты точек на следах лучей в планарном волноводе, но не их направления и кривизны, то физически естественной метрикой для измерения возмущений пучка (5) является метрика  $S$ . Таким образом, вычисление коэффициентов (15) неустойчиво [8] и, следовательно, восстановление распределения коэффициента замедления по пучку лучей (5), известному приближенно, является некорректной задачей.

В § 2.2 исследована задача восстановления РКЗ для круговой планарной линзы. РКЗ круговой линзы определяется центром  $O(x_0, y_0)$  симметрии линзы и функцией профиля  $\tilde{n}(r): n(x, y) = \tilde{n}(r)$ , где  $r$  – расстояние от точки  $(x, y)$  до центра  $O$ . Для круговой планарной линзы решение обратной задачи можно разбить на два этапа: сначала по прямолинейным началам и концам лучей найти центр линзы, а затем вычислить функцию профиля. Поиск центра линзы основан на свойствах лучей, проходящих через круговую планарную линзу.

#### Предложения 1–5. (см. рис. 2)

Прямая, проходящая через центр линзы и точку искривленного луча, ближайшую к центру, является осью симметрии луча.

Ось симметрии каждого искривленного луча может быть найдена как биссектриса угла, образованного прямолинейными началом и концом луча (надо взять угол, содержащий сам луч).

Центр  $O$  линзы может быть найден как точка пересечения осей симметрии двух различных искривленных лучей зондирующего пучка.

Лучи с прицельными расстояниями  $h > 0$  (в круговой линзе с монотонно убывающей функцией профиля) являются кривыми, выпуклыми вниз, а лучи с прицельными расстояниями  $h < 0$  являются кривыми, выпуклыми вверх.

Среди лучей, проходящих через область неоднородности круговой линзы, единственным прямым лучом является луч, проходящий через центр линзы. Он совпадает с продольной оптической осью круговой планарной линзы.

После перехода в систему координат с началом в найденном центре круговой линзы искомая функция профиля РКЗ вычисляется для  $r > 0$  по формуле

$$\tilde{n}(r) = \frac{h_0 \sqrt{1 + \alpha^2}}{r}, \quad (16)$$

где  $h_0$  – прицельное расстояние искривленного луча  $y = Y(x)$ , проходящего на расстоянии  $\zeta, \zeta < r$ , от центра линзы,

$$\alpha = \frac{x + Y(x) Y'(x)}{-Y(x) + x Y'(x)}, \quad (17)$$

а  $(x, Y(x))$  – точка луча, находящаяся на расстоянии  $r$  от центра.

При решении практической задачи данные о зондирующем пучке лучей (5) являются дискретными и содержат измерительные ошибки. Алгоритмизация решения обратной задачи для таких данных проведена в двух следующих параграфах.

В § 2.3 посвящен построению аппроксимации следов лучей по дискретным возмущенным данным и регуляризованному способу вычисления их направлений. Взятый за основу классический алгоритм построения сглаживающих кусочно-кубических сплайнов модифицируется таким образом, чтобы учесть априорную информацию о

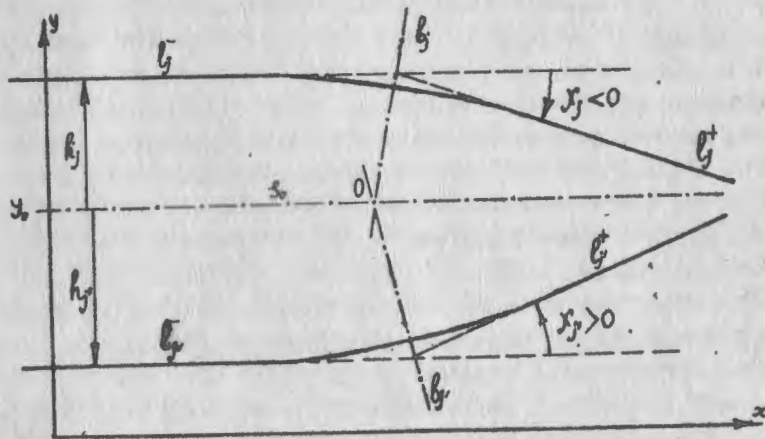


Рис. 2. Центр  $O$  круговой планарной линзы является точкой пересечения осей симметрии  $\zeta$  искривленных следов лучей зондирующего пучка и продольной оси симметрии  $z$  линзы, проходящей в направлении лучей зондирующего пучка на входе в линзу.  $z$  является границей между лучами зондирующего пучка, выпуклыми вверх ( $X'(y) > 0$ ), и лучами, выпуклыми вниз ( $X'(y) < 0$ ).

выпуклости/вогнутости аппроксимируемого луча при назначении весов функционала невязки и уточнении значения параметра сглаживания, найденного по невязке.

В § 2.4 на базе результатов двух предыдущих параграфов построен регуляризованный алгоритм восстановления РКЗ круговой планарной линзы по приближенным дискретным данным о следах лучей зондирующего пучка. Вычисление центра линзы только по прямолинейным начальным и конечным участкам искривленных зондирующих лучей приводит к плохо обусловленной задаче. Поэтому ищется приближенная продольная ось симметрии линзы как прямая, являющаяся границей между искривленными лучами, выпуклыми вверх, и искривленными лучами, выпуклыми вниз (рис. 2). Алгоритм вычисления центра симметрии линзы, учитывающий информацию о продольной оси, является численно устойчивым. На этапе вычисления функции профиля значения (16) усраждаются по всем точкам пересечения зондирующих лучей с окружностью радиуса  $r'$  с центром  $Q$ .

В третьей главе построенный способ диагностики ТВЛ по данным лучевого теста исследован методом вычислительного эксперимента.

В § 3.1 изложен алгоритм вычисления функции профиля РКЗ для идеальной обобщенной линзы Динеберга с неполной апертурой  $/9/$ . Алгоритм позволяет для выбранных значений приведенного фокусного расстояния и полуширины рабочей апертуры вычислять функцию профиля и ее производную на выбранной сетке узлов.

В § 3.2 описана процедура моделирования входных данных лучевого теста - получение дискретных данных о следах лучей зондирующего пучка в круговой планарной линзе с известным РКЗ. Процедура включает численное решение серии задач Коши для обыкновенного дифференциального уравнения, которому удовлетворяют следы лучей в круговой планарной линзе. Коэффициенты уравнения вычисляются по таблице значений функции профиля РКЗ, близкой к идеальной линзе Динеберга с неполной апертурой.

§ 3.3 содержит описание структуры программного комплекса для решения прямой задачи трассировки следов лучей в круговой планарной линзе с известным РКЗ и решения обратной задачи восстановления РКЗ круговой планарной линзы по дискретным данным о следах лучей зондирующего пучка. Обсуждены также особенности

программной реализации общематематических алгоритмов построения интерполяционных кусочно кубических сплайнов с различными непериодическими граничными условиями на концах интервала, построения сглаживающих сплайнов, вычисления значений сплайна и его производных в неузловых точках.

В § 3.4 приведены результаты восстановления РКЗ круговой планарной линзы по модельным данным. Исследована зависимость ошибки восстановления РКЗ от уровня шума в данных лучевого теста, числа лучей в зондирующем пучке и числа оцифрованных точек на лучах. Сформулированы рекомендации по проведению лучевого теста ТВЛ, в частности, по оцифровке точек на следах зондирующих лучей и первичной обработке данных.

В § 3.5 приведены результаты обработки экспериментальных данных лучевого теста для реальной ТВЛ с помощью разработанного программно-математического обеспечения. Точность восстановления РКЗ анализируемых планарных линз оказалась выше точности его восстановления традиционными способами. В частности, для периферийной части планарной линзы точность восстановления РКЗ повысилась почти на порядок. Для центральной части линз точность восстановления повысилась в два-три раза. Надо отметить, что качество планарной линзы (абберационность, ширина рабочей апертуры и т.п.) определяются в основном точностью изготовления ее периферийной части. В то же время именно на периферийной части линзы традиционные методы работали на много хуже, чем в центральной части. Напротив, разработанный способ диагностики ТВЛ по следам лучей значительно точнее восстанавливает РКЗ в периферийной части ТВЛ, что позволяет существенно лучше контролировать фокусирующие свойства планарных линз по сравнению с традиционными методами диагностики.

В заключении перечисляются основные оригинальные результаты, полученные в диссертации, и рассматриваются области применения этих результатов.

В приложении к диссертации приведены тексты фортран-подпрограмм для сплайн-интерполяции и аппроксимации кусочно кубическими сплайнами.

Основные результаты диссертации можно сформулировать в следующих пунктах.

I. Проведен анализ прямой задачи прехождения лучей в пла-



нарной линзе. Доказано, что фокусирующие свойства планарной линзы полностью характеризуются распределением коэффициента замедления как функцией точки плоскости, и поэтому распределение коэффициента замедления является основной характеристикой планарной линзы.

2. Дана математическая постановка обратной задачи восстановления распределения коэффициента замедления планарной линзы по следам лучей. Задача восстановления распределения коэффициента замедления планарной линзы по следам лучей зондирующего пучка математически эквивалентна задаче восстановления скалярной метрики островного типа по форме ее геодезических, покрывающих анализируемую область.

3. Разработан регуляризованный метод решения поставленной обратной задачи восстановления распределения коэффициента замедления для двух классов планарных линз, наиболее важных в интегральной оптике: а) планарных линз, в которых зондирующий пучок лучей не имеет фокальных точек в области диагностики; б) планарных линз, обладающих круговой симметрией.

4. Для круговых планарных линз, имеющих в технических приложениях самое большое значение, построен устойчивый алгоритм восстановления распределения коэффициента замедления по дискретным данным о следах лучей зондирующего пучка.

5. Проведено исследование разработанного способа диагностики круговых планарных линз по следам лучей зондирующего пучка с помощью численного эксперимента. Выяснены границы применимости построенного способа диагностики и найдены оценки точности восстановления распределения коэффициента замедления планарных линз в зависимости от точности задания входных данных.

6. Разработан комплекс прикладного программно-математического обеспечения для диагностики круговых ТВЛ по дискретным данным о следах лучей. Комплекс внедрен на ИЦ Университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы. Получаемые с помощью него результаты обработки экспериментальных данных используются в работе кафедр радиофизики, и теоретической физики, научно-учебного центра УДН.

7. Новый способ диагностики, реализованный программно, дал возможность восстанавливать количественные оптические характеристики планарных линз почти на порядок точнее по сравнению с традиционными методами диагностики, особенно в периферий-

ной части линзы, которая в основном и определяет фокусирующие свойства планарных линз.

8. Разработанный метод диагностики пригоден не только для тонкопленочных волноводных линз лонберговского типа, для которых он собственно и разрабатывался, но также и для градиентных, и для геодезических планарных линз.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Комаров В.Н., Ловецкий К.П., Микулич А.В., Севастьянов Я.А. Согласованное устойчивое решение задач прямого и обратного дискретного преобразования Фурье // Теория и методы решения некорректно поставленных задач и их приложения. Труды Всесоюзной школы-семинара по некорректно поставленным задачам (23-30 июня 1985 г., Саратов). Под ред. акад. А.Н.Тихонова / Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1985. - С. 84-85.
2. Комаров В.Н., Ловецкий К.П., Микулич А.В., Севастьянов Я.А. Согласованное устойчивое решение задач прямого и обратного дискретного преобразования Фурье // Численные методы в задачах математической физики. - М.: Изд-во УДН, 1985. - С. 37-41.
3. Микулич А.В. Э в выполнении дифференцируемой функции на круге по ее неполному следу на сетке // Современные задачи математической физики и математического обеспечения ЭВМ. - М.: Изд-во УДН, 1986. - С. 63-70.
4. Курьшкин В.В., Микулич А.В., Швачка А.В. Восстановление эффективного показателя преломления круговой волноводной линзы. - Дубна: ОИЯИ, 1986. - 14 с. - (Сообщ. Объед. ин-та ядерн. исслед.; Р5-86-665)
5. Микулич А.В. О задаче восстановления гладкой функции на круге по возмущенному следу ее градиентного поля на сетке // Системы массового обслуживания и информатика. - М.: Изд-во УДН, 1987. - С. 146-151.
6. Курьшкин В.В., Микулич А.В., Севастьянов Я.А. Восстановление изотропной сферически симметричной метрики островного типа по форме геодезических // Всемирное тяготение и теория пространства и времени. - М.: Изд-во УДН, 1987. - С. 83-84.
7. Микулич А.В., Швачка А.В., Шокол С.В. О вычислении эффективного показателя преломления круговой волноводной линзы по дискретным данным. - Дубна: ОИЯИ, 1987. - 18 с. - (Сообщ.

Объед. ин-та ядерн. исслед.; ПИ-87-336)

8. Курьякин В.В., Микулич А.В., Севастьянов Л.А. Восстановление изотропной метрики островного типа по форме геодезических // Гравитация и фундаментальные взаимодействия. - М.: Изд-во УДН, 1988. - С. 124.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Хансперджер Р. Интегральная оптика. - М.: Мир, 1985. - 318 с.
2. Аникин В.И., Шокол С.В. Фокусирующие элементы интегральной оптики // Зарубежная радиоэлектроника. - 1984. - № 5. - С. 67-77.
3. Самарский А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент // Вестник АН СССР. - 1979. - № 5. - С. 38-41.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Марченко Н.А., Пергамент А.Х., Пергамент М.И. О проблемно-ориентированных системах обработки экспериментальных данных // ДАН СССР. - 1985. - Т. 281, № 4. - С. 802-806.
5. Арсенин В.Я. Задачи вычислительной диагностики в медицине // Некорректные задачи естествознания. - М.: Изд-во МГУ, 1987. - С. 161-170.
6. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. - М.: Мир, 1984. - 512 с.
7. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия: Методы и приложения. - М.: Наука, 1986. - 760 с.
8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1986. - 288 с.
9. Sochacki J., Gomez-Reino C. Nonfull-aperture Luneburg lenses: a novel solution // J. Appl. Opt. - 1985. - Vol. 24, № 9. - P. 1371-1373.

Тематический план 1989 г., № 270

Подписано в печать 24.01.89 г. Л-28578. Формат 60x90/16.  
Ротапринтная печать. Усл.печ.л. 1,0. Усл.кр.-отт. 0,89.  
Уч.-изд.л. 1,125. Тираж 100 экз. Заказ 132. Бесплатно.

Издательство Университета дружбы народов  
117923, ГСП-1, Москва, ул.Орджоникидзе,3

---

Типография Издательства УДН. 117923, Москва  
ул.Орджоникидзе, 3