

На правах рукописи



КАРОВ

Дмитрий Дмитриевич

**ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ В ГРАДИЕНТНО-ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ**

01.04.04 – физическая электроника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель

заслуженный деятель науки РФ,
Лауреат Государственной премии,
доктор химических наук, профессор
Карапетян Гарегин Оганесович

Официальные оппоненты:

Голиков Юрий Константинович,
доктор физико-математических наук,
профессор ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Ананьев Анатолий Владимирович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
ОАО «НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»,

Ведущая организация:

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится 31 мая 2012 года в 16 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.01 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», расположенном по адресу:
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 29, IV учебный корпус, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « ___ » апреля 2012 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Коротков А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена комплексному развитию методов интегральной фотоупругости (поляризационно-оптической томографии) применительно к диагностике полей остаточных напряжений (ОН) в стеклянных градиентных стержневых структурах с аксиально-симметричным распределением показателя преломления с учетом искривления зондирующих лучей.

Актуальность темы

Градиентно-оптические элементы из стекла (стержневые линзы, передающие изображение (градань), световоды и заготовки для них и т.д.), представляют собой цилиндрические структуры с радиальным распределением показателя преломления (РПП) $n(r)$. РПП задаётся соответствующим распределением химического состава, который формируется тем или иным путём (ионообменной диффузией, парофазным осаждением) при высоких температурах (выше интервала стеклования). Соответственно, по сечению цилиндра образуется непрерывное (в случае граданов), дискретное или комбинированное (в случае заготовок для оптических волоконных световодов (ОВС)) распределение стекол с переменным химическим составом.

Переменный состав стекла обуславливает радиальные градиенты температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), вязкоупругих и теплофизических характеристик, что приводит к возникновению ОН в структуре даже при её очень медленном охлаждении от температур синтеза.

Напряжения в градиентных стержнях препятствуют созданию заданного РПП, могут приводить к их изгибу из-за потери устойчивости и к разрушению. Напряженное состояние, обусловленное ОН или/и эксплуатационными (силовыми, температурными) факторами, может быть причиной фотоупругих искажений в оптических элементах. Остаточная оптическая анизотропия (ОА), обусловленная напряжениями, вызывает aberrации, ухудшающие функциональные параметры граданов. В ОВС эффекты фотоупругости могут приводить к искажению РПП, определяющему диаметр модового поля, длину волны отсечки, неселективные (избыточные) потери. В активных элементах (АЭ) мощных лазеров при теплоотводе прокачкой хладагента возникают температурные градиенты и термоупругие напряжения, приводящие к термоволновым aberrациям и к разрушению. Для упрочнения АЭ и некоторых типов ОВС в приповерхностных областях формируют стеклообразные слои (низкотемпературным ионным обменом, внешним осаждением), создающие сжимающие напряжения. Сопутствующим эффектом в этих случаях является возникновение значительных градиентов РПП в приповерхностных областях.

Для исследования распределения ОН в прозрачных безградиентных осесимметричных объектах используется метод оптической томографии поля напряжений при поперечном просвечивании (интегральной фотоупругости), основанный на наличии в образце пространственно-неоднородной ОА, индуцированной напряжениями.

Математический аппарат метода разработан в предположении прямолинейного распространения зондирующих лучей. В то же время, в градиентно-оптических объектах просвечивающие лучи существенно отклоняются от прямолинейного распространения из-за рефракции (в высокоапертурных градах перепады ПП могут достигать $\Delta n \sim 0.1$, в упрочняющих слоях АЭ и заготовок для ОВС реализуются значительные градиенты ОН).

Указанные обстоятельства определяют актуальность разработки неразрушающих оптических (томографических) методов диагностики напряженного состояния в градиентных элементах, позволяющих определить уровень и распределение ОН в структурах еще на лабораторных этапах их создания и скорректировать параметры технологических процессов для обеспечения допустимых значений напряжений.

В связи с этим возникает задача обобщения метода оптической томографии напряжений на случай объектов с градиентом ПП, определения границ применимости аппарата традиционной интегральной фотоупругости.

Разработанные в диссертации методы диагностики актуальны также для решения и других задач технической и физической электроники: диагностики напряжений в покрытиях, регулирования ОН при изготовлении неоднородных стеклянных изделий, спаев стекло – металл, стекло – керамика и стекло – стекло различной геометрии (бусиновых и многослойных цилиндрических, сэндвичевых и др.), пластмассовых сцинтилляторов, люминесцентных преобразователей и др.

Цель и задачи диссертационной работы

Цель исследований – разработка методов томографической реконструкции полей напряжений (радиальных распределений всех компонентов ОН) в цилиндрических структурах с градиентом показателя преломления с учетом непрямолинейного распространения просвечивающих лучей.

Достижение этой цели потребовало решения следующих научных задач:

1. Получения обобщенных соотношений метода оптической томографии напряжений и экспресс-диагностики напряженного состояния цилиндрических структур с аксиально-симметричным РПП с учетом искривления зондирующих лучей для поперечного (трансверсального) и продольного вариантов просвечивания.

2. Разработки устойчивых алгоритмов и компьютерных программ для реконструкции радиальных распределений всех компонентов ОН в цилиндрических структурах с градиентом показателя преломления по проекционным томографическим данным.

3. Реконструкции радиальных распределений всех компонентов ОН в ряде градов, заготовок для ОВС и упрочненных лазерных стержнях на основе полученных обобщенных соотношений и томографических данных.

Научная новизна

В работе впервые комплексно исследованы проблемы, относящиеся к диагностике ОН и ОА в стержневых градиентных структурах.

Получены обобщенные соотношения оптической томографии напряжений (интегральной фотоупругости) в цилиндрических структурах с аксиально-симметричным распределением показателя преломления с учетом искривления зондирующих лучей.

Исследован специфический вариант просвечивания при распространении винтовых (сагиттальных) лучей вдоль оси градиентного цилиндра, ранее в теории фотоупругости не рассматривавшийся.

Разработан алгоритм реконструкции распределения продольной (функциональной) оптической анизотропии в градах на основе данных поляризационно-оптической томографии стержней при поперечном просвечивании.

Обобщен метод экспресс-диагностики контурных осевых напряжений на случай градиентных стержней.

Впервые реконструированы радиальные распределения всех компонентов ОН для ряда градов, упрочненных заготовок для ОВС и лазерных стержней.

В работе значительную часть составляют исследования ОН в градах на основе алюмоборосиликатных, алюмоборосиликатногерманатных и цирконосиликатных стекол, изготавливаемых методом высокотемпературного обмена катионов Li (стекло) \Leftrightarrow Na (расплав соли). Образующийся диффузионный профиль катионов дает по сечению града непрерывный ряд стекол, соответствующий эквимольной замене щелочных окислов.

Как уже отмечалось, пространственное (радиальное) распределение химического состава, задающее функциональный профиль ПП, неизбежно приводит к возникновению градиентов ряда механических, термофизических и других характеристик стекла. Это является причиной возникновения ОН при охлаждении града от температур синтеза, соответствующих вязкоупругому состоянию материала.

Для моделирования процессов развития напряженного состояния в градах автор использует положение о том, что время и температура ионообменного синтеза обеспечивают полную координационно-структурную релаксацию микроучастков градиентного стекла. Как результат, структура и свойства стекла в точках радиальной координаты (r) градиентного элемента, полученного в результате диффузии, тождественны структуре и свойствам однородных стекол, щелочной состав которых соответствует данной локальной концентрации обменивающихся ионов. Таким образом, если известен концентрационный профиль в ионообменном слое, свойства отдельных микроучастков стекла при высокотемпературном ионном обмене могут быть получены на основе результатов исследования соответствующих рядов стекол, полученных традиционным высокотемпературным синтезом из шихты (далее – модельных рядов).

В работе исследованы модельные ряды стекол при эквимольной замене щелочей ($Li \Leftrightarrow Na$) и постоянстве нещелочного состава. Проведены исследования концентрационных зависимостей калориметрических, вискозиметрических, дилатометрических характеристик в температурном диапазоне, включающем интервал стеклования, а также закономерностей изменения механических, упругооптических, спектральных свойств в рядах модельных стекол.

Практическая значимость

Разработанные в диссертации методы и алгоритмы использованы при выполнении хоздоговорных и инициативных НИР по диагностике ОН в упрочненных заготовках для ОВС (НПО «Кварц»), лазерных активных элементах, упрочненных низкотемпературным ионным обменом (ГОИ им. С.И. Вавилова), оптических и акустических графанов (АОЗТ ГРИНЕКСТ, ЛТИ ЦБП, ГОИ им. С.И. Вавилова).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обобщение соотношений оптической томографии напряжений (обратной задачи интегральной фотоупругости) с учетом криволинейности распространения просвечивающих лучей в градиентных цилиндрических объектах позволяет реконструировать:

- при поперечном просвечивании – распределение осевых ОН в цилиндрических объектах с произвольным градиентом ПП;

- при продольном просвечивании – радиальное распределение разности тангенциальных и радиальных напряжений в практически важном случае, когда РПП в градане близко к идеально-фокусирующему, и лучи распространяются по квазисинусоидальным траекториям.

2. Для последнего случая обобщенные соотношения прямой задачи интегральной фотоупругости позволяют проводить расчеты радиального распределения продольной (функциональной) ОА для отрезков графанов произвольной длины на основе данных по реконструкции ОН при поперечном просвечивании градана, что, в свою очередь, открывает возможности для проектирования элементов с заданным профилем двулучепреломления (ДЛП).

3. Концентрационные зависимости T_g и ТКЛР в исследованных рядах стекол обнаруживают отклонения от аддитивности при эквимольной замене щелочей ($Li \Leftrightarrow Na$) и постоянстве нещелочного состава, обусловленные «эффектом двух щелочей».

4. Непараболические радиальные распределения ОН в граданах являются следствием нелинейных и немонотонных зависимостей и существенных градиентов T_g и ТКЛР по сечению графанов. Конкретные профили ОН определяются режимом охлаждения (и термообработки) после завершения процесса синтеза изделия.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на семинарах в ГОИ им С.И. Вавилова (1988 г.), Институте кибернетики Эстонской АН (1989 г.), ИХС РАН им. И.В. Гребенщикова (2003 г.). Всероссийских и Международных конференциях: Всероссийской конференции по оптической обработке информации (1986 г.), IV Всесоюзном совещании «Методы и приборы для точных дилатометрических исследований материалов в широком диапазоне температур» (1987), VII Всесоюзном симпозиуме по оптическим и спектральным свойствам стекол (1989 г.), IV Всесоюзном симпозиуме по вычислительной томографии (1989 г.), VII Всесоюзной конференции по кварцевому стеклу (1991 г.), V Всесоюзном симпозиуме по вычислительной томографии (1991 г.), XV International congress on glass (1989 г.), «Laser Optic» (1993, 1995, 1998, 1999 гг.), International symp. of computerized tomography (1993 г.), European East–West Conf. & exhibithion on materials and process (1993 г.), International Workshop on new approaches to HI-tech materials 97 “Nondestructive Testing and Computer Simulations in Materials Science and Engineering” (1997), X межд. научно-практич. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (2010 г.).

Публикации. Результаты работы отражены в 18 публикациях, в числе которых: 4 статьи в журналах Перечня ВАК, 5 статей в сборниках трудов, 9 тезисов докладов на конференциях.

Личный вклад автора. Основные результаты получены автором лично или при его определяющем участии.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, 2 приложений и списка цитируемой литературы (209 наименований), содержит 54 рисунка и 12 таблиц. Общий объём диссертации – 182 страницы, включая приложения (21 страница).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** изложена мотивация развития методов поляризационно-оптической томографии напряжений (интегральной фотоупругости) для неразрушающей диагностики структур с градиентом показателя преломления, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна полученных результатов, их практическая и научная значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

В **первой главе** приводится информация о напряжениях и исследованиях ОН в безградиентных цилиндрических структурах методом интегральной фотоупругости при одноракурсном поперечном просвечивании. Идея метода: цилиндр просвечивается в поляриметре перпендикулярно оси симметрии (Z) и

на множестве лучей измеряется интегральная разность фаз $\Delta(x)$ между двумя ортогонально поляризованными (по т. н. квазиглавному направлениям n, l) колебаниями на выходе из объекта для каждого параметра просвечивания x . Далее решается некорректная обратная задача реконструкции локального распределения $\sigma(r)$ из массива данных $\Delta_j(x_j)$ с учетом априорной информации.

Дается обзор по вопросам, базовым для предмета диссертационной работы. Обсуждается обоснованность т. н. «закона суммы» $\sigma_z = \sigma_r + \sigma_\theta$ (полученного из общих соотношений теории упругости) для ОН, возникающих в градиентных стеклянных стержнях и стержневых композициях со стеклом при охлаждении через интервал стеклования (обусловленных процессами вязкоупругой релаксации термоупругих напряжений). Отмечается необходимость специального исследования этого вопроса в рамках диссертационной работы.

Сформулированы задачи диссертационной работы в целом.

Вторая глава посвящена анализу связи ОА и компонентов напряжений в цилиндрических структурах с градиентом ПП Δn для различных вариантов просвечивания (рис. 1): поперечного (трансверсального), продольного, а также для специфического варианта просвечивания при распространении винтовых (сагиттальных) лучей вдоль оси градиентного цилиндра.

В основе анализа – закон Вертгейма, связывающий главные ($\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$) и квазиглавные (σ_n, σ_l) напряжения с интегральной разностью фаз Δ на пути l :

$$\Delta = \int_{(l)} d\Delta = C_0 \int_{(l)} (\sigma_n - \sigma_l) dl,$$

где C_0 – оптический коэффициент напряжений; λ – длина волны.

В диссертации выведены достаточно общие интегральные уравнения, связывающие $\Delta(x)$ и локальные распределения компонентов ОН $\sigma(r)$ для градиентного длинного цилиндра при условии малости ОА.

Показано, что при просвечивании слабо- и среднеградиентных осесимметричных структур ($gR \leq 0.2 \div 0.3$; g – силовая постоянная, R – радиус градана) на состояние поляризации зондирующего луча влияют: при поперечном просвечивании – $\sigma_z(r)$; при продольном – $\Delta\sigma_{\theta r}(r) = \sigma_\theta(r) - \sigma_r(r)$.

Интегральные уравнения в этих случаях приводятся к абелевскому виду, и в результате их инверсии имеем:

– в случае поперечного просвечивания (рис. 1, б) при произвольном распределении ПП $n(r)$:

$$\sigma_z(r) = -(\pi \cdot C_0)^{-1} \frac{du}{dr} \int_{u(r)}^{u_R} \frac{d\Delta^T}{da} \frac{da}{\sqrt{a^2 - u^2}},$$

где $\Delta^T(x)$ – интегральная разность фаз при поперечном просвечивании градана, $u = rn(r)$, $a = xn_R$ – постоянная для луча, параметр просвечивания которого равен x ; n_R – значение ПП $n(r)$ на поверхности цилиндра. Распределение двух других главных компонентов тензора напряжений – $\sigma_r(r)$ и $\sigma_\theta(r)$ – могут быть найдены из решения дифференциального уравнения равновесия напряжений в цилиндре и «закона суммы».

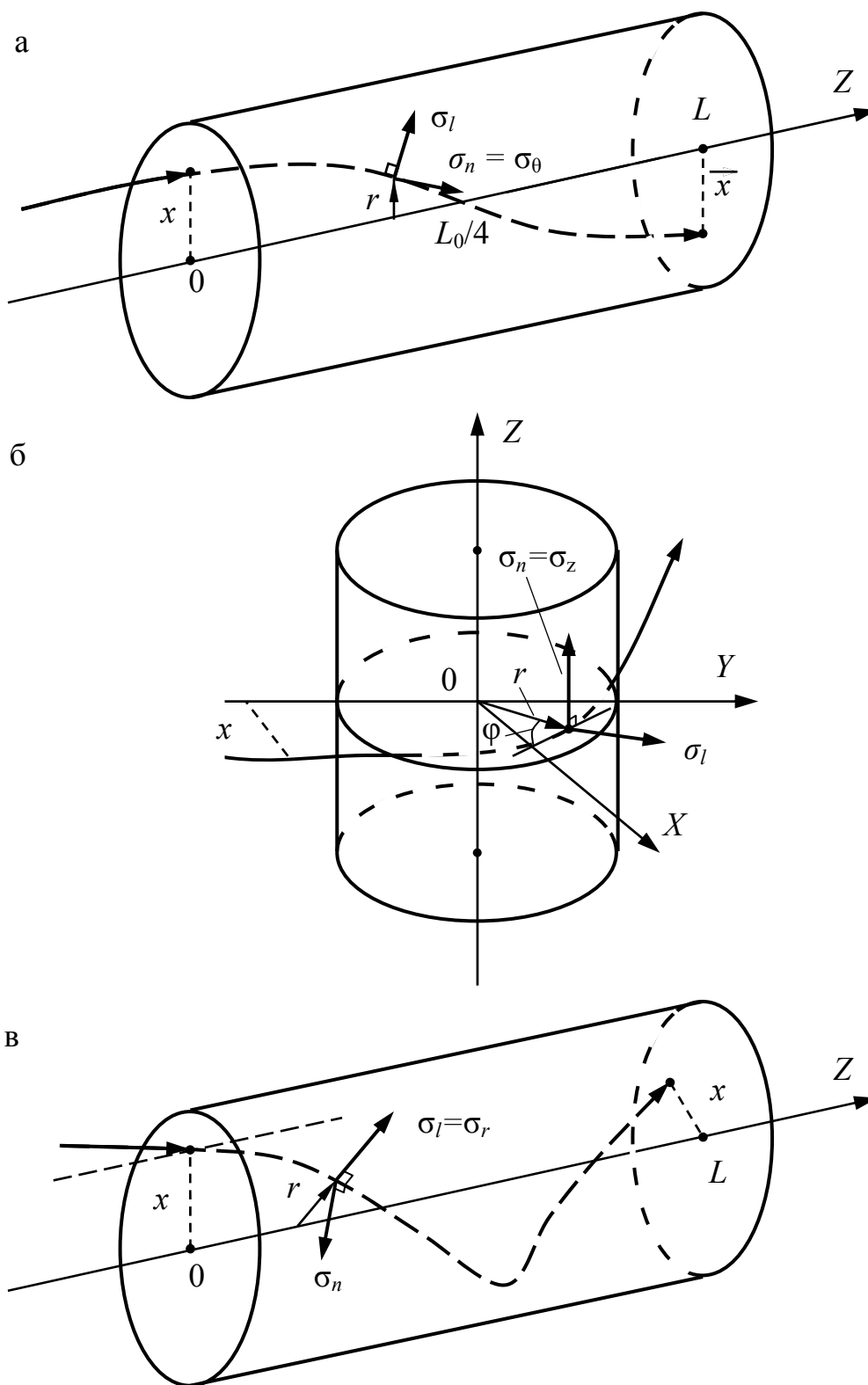


Рис. 1. Прохождение луча света через цилиндрический градан:
 а – меридионального луча вдоль оси; б – перпендикулярно оси; в – винтового луча
 вдоль оси

– при продольном просвечивании градиентного стержня параллельным световым пучком, когда все распространяющиеся лучи являются

меридиональными (рис. 1, а), только для важнейшего случая самофокусирующего РПП:

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = -\frac{n'}{\pi C_0} \int_{n(r)}^n \frac{d\Delta^L / db}{\sqrt{b^2 - n^2}} db,$$

где $b=n(x)$; x – высота точки входа луча; $\Delta^L(x)$ – интегральная разность фаз для полуволнового отрезка градана при продольном просвечивании.

Если в градане реализован сагиттальный луч, распространяющийся по винтовой траектории (винтовой луч, рис. 1, в), то для разности напряжений получается простое выражение:

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = -\frac{\Delta^S}{C_0 L_B},$$

где $L_B = L\sqrt{1 + (2\pi x/L_0)^2}$ – длина винтовой линии, L_0 – длина периодичности траектории, Δ^S – интегральная разность фаз при винтовом просвечивании. Существенный недостаток, однако, состоит в трудности технической реализации винтовых лучей в граданах при всех параметрах просвечивания.

Вопрос адекватности предположения об идентичности траекторий двух ортогонально поляризованных лучей, использованного при выводе приведенных соотношений, в случае продольного просвечивания, когда геометрическая длина пути (даже для четвертьволнового отрезка градана) может быть достаточно большой, обсуждается в разделе 4 диссертации.

Для случая безградиентного цилиндра $n = \text{const}(r)$, $n' = 0$, $n(r) \equiv n(x)$, и полученные выражения сводятся к известным соотношениям интегральной фотопругости.

Получены обобщенные соотношения для экспресс-оценки напряжений на поверхности градиентного цилиндра (контурных ОН) $\sigma_z(R)$, которые играют определяющую роль в механизмах разрушения:

$$\sigma_z(R) = \frac{3}{4} \frac{\Delta^{\min}}{C_0 \sqrt{u_R^2 - a_m^2}} [u']_R.$$

Вывод этого соотношения дается в Приложении А. Для оценки $\sigma_z(R)$ достаточно измерить величину $\Delta^{\min} = \Delta(x_m)$ в точке минимума x_m , и иметь данные об оптических параметрах: n_0 , n_R , $u'(R)$, определяемые заданным профилем ПП. В безградиентном приближении ($n(r)=\text{const}=n_R$, $\Delta n=0$, $u'=n_R$), и это соотношение переходит в известную формулу В.Л. Иденбома для $\sigma_z(R)$ в закаленных стеклянных стержнях.

Приведены результаты разработки и тестирования регуляризованного алгоритма реконструкции распределений всех компонентов напряжений в градиентно-оптических цилиндрических структурах с учетом криволинейного распространения лучей зондирующих объект. Разлит вариант, при котором $\Delta(x)$ аппроксимируется сглаживающими кубическими сплайн-функциями, благодаря

чему данный алгоритм является устойчивым к погрешностям входных данных. Детали обоснования, разработки, выбора граничных условий сплайна и тестирования алгоритма изложены в Приложении Б.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию ОН в реальных градиентных объектах при поперечном просвечивании. Выбор объектов определялся как практическими задачами диагностики напряжений, важными для разработчиков, так и особенностями структур, интересными в научном плане как объекты для реконструкции ОН. Из этих соображений выбраны структуры, где существенны отклонения просвечивающих лучей от прямолинейных траекторий: с непрерывным РПП (граданы) с большим перепадом ПП и/или большого диаметра, а также объекты с большим градиентом напряжений со значительной рефракцией в приповерхностных слоях с дискретной или комбинированной неоднородностью ПП (упрочненные АЭ, где диффузионный профиль РПП – в тонком упрочняющем слое, заготовки для ОВС с упрочняющими титано-силикатными покрытиями).

Граданы на основе неорганических стекол. Впервые реконструированы распределения ОН в граданах, разработанных в СПбГПУ и ЛТИ ЦБП марок ЛК, ОФЭ-1, ПЭГ-101, ТСМ-405, ТСМ-412, ОПС 117-206, - 83, - 224, - 232; марок ЛК-1552, 1573, (АОЗТ ГРИНЕКСТ). Приводятся результаты исследования влияния термообработки граданов марок ОФЭ-1 и ПЭГ-101 на распределение ОН. Нагрев и выдержка при $T \geq T_g$ приводят к практически полной релаксации существовавших до этого закалочных и диффузионных ОН. Таким образом, напряжения в термообработанных граданах должны иметь преимущественно «коэффициентную» природу. Показано, что термообработка граданов ПЭГ-101 не приводит к существенному перераспределению или изменению величины напряжений по сравнению с этими граданами до термообработки, откуда следует, что напряжения в граданах на стекле ПЭГ-101 имеют в основном коэффициентный характер; вклад закалочных напряжений в напряженное состояние мал.

Распределение напряжений в исходных граданах типа ОФЭ-1 коренным образом отличается от распределений, характерных для граданов ПЭГ-101, зависимости более соответствуют картине упрочняющих ОН, характерной для закалённых штабиков. Термообработка граданов приводит к заметному перераспределению напряжений – эпюры ОН приобретают вид, более близкий к тому, который соответствует «коэффициентным» напряжениям. Это говорит в пользу того, что в граданах на основе стекла ОФЭ-1 напряженное состояние обусловлено совместным действием как «коэффициентных», так и закалочных ОН.

Упрочненные лазерные стержни. Впервые проведена неразрушающая диагностика ОН в лазерных атермальных неодимовых АЭ, предоставленных ГОИ им. С.И. Вавилова: ГЛС 1715 –2-3, упрочненные низкотемпературным ионным обменом Na^+ (стекло) $\Leftrightarrow \text{K}^+$ (расплав) и алюмосиликофосфатном ГЛС 817 – 4, упрочненные высокотемпературным ионным обменом Na^+ , K^+ . Проведена как полная реконструкция распределения ОН, так и определение

аксиальных контурных (упрочняющих) напряжений по экспресс-методу, разработанному в диссертации.

Заготовки для ОВС с упрочняющими титано-силикатными покрытиями. Исследовались закономерности упрочнения заготовок для оптических волоконных световодов путём внешнего осаждения слоёв титано-силикатного стекла (имеющего ультранизкие и отрицательные значения ТКЛР). При этом ожидалось радикальное увеличение сжимающих поверхностных напряжений при увеличении концентрации TiO_2 и уменьшении толщины упрочняющего слоя. Обнаружено, однако, ухудшение механических свойств упрочняющего слоя при больших концентрациях двуокиси титана. С использованием метода ЭПР показано, что это связано с появлением ионов Ti^{+3} наряду с Ti^{+4} , приводящим к нарушению стехиометрического структурного равновесия. Обнаружено, что в одномодовых ОВС эффект упрочнения приводит к значительным фотоупругим искажениям РПП вследствие больших растягивающих ОН в сердечнике, уменьшающих заданный перепад ПП. При оптимизации структуры получены упрочняющие напряжения 50 МПа.

В четвертой главе представлен ряд результатов исследования распределений ОН в тонких срезах граданов разрушающим «методом дисков», дается сопоставление полученных распределений ОН с данными томографической реконструкции по продольному и поперечному просвечиванию.

Дан анализ применимости однотоакторного приближения для реконструкции ОН при продольном просвечивании. Проведено моделирование продольной ОА граданов на основе модельных распределений ОН и реальных данных реконструкции напряжений по данным поперечной оптической томографии (прямая задача интегральной фотоупругости). При этом использовались полученные в разделе 2 соотношения, дающие связь между ОА и ОН при освещении торца градана параллельным пучком (меридиональные лучи). Для получения зависимостей «на луче» и затем осевой ОА как функции координаты предполагалось, что граданы имеют РПП, близкий к идеально-фокусирующему, для которого известно аналитическое выражение уравнения траектории. Показано, что для достаточно малых величин gR (до 0.3) среднее отклонение не превышает 5%, что говорит о корректности предложенных допущений в данном случае. Получены зависимости интегральной разности фаз от длины граданов с разным распределением ОН при различной высоте входа луча.

Показано, что можно оперативно получить адекватную информацию о зависимости радиального распределения продольного ДПП от длины граданов на основе данных варианта трансверсальной поляризационной томографии, не требующем трудоемких действий по подготовке образцов как в случае продольного просвечивания. Это, в свою очередь, дает возможность проектировать градиентные элементы определенной длины с заданным профилем двулучепреломления, используя неразрушающие методы.

В пятой главе представлены результаты исследования зависимостей «состав–свойство» модельных рядов силикогерманатных стекол для граданов системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{GeO}_2$ и $\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{ZrO}_2-\text{Sb}_2\text{O}_3$ с эквимольной заменой Li_2O на Na_2O и постоянстве нещелочного состава. На основе анализа экспериментальных данных ряда физико-механических характеристик по температурно-концентрационным зависимостям вязкости и температурного коэффициента ТКЛР, а также гистерезисных дилатометрических кривых предложены соотношения, позволяющие рассчитывать структурную релаксацию в указанных стеклах при произвольном соотношении щелочных оксидов. Получены уравнения регрессии для равновесного и изоструктурного ТКЛР и для параметров уравнений температурной зависимости вязкости. Показано, что значения релаксационных постоянных для всех исследованных стекол данного ряда одинаковы в пределах погрешностей их определения.

На основе кинетической теории стеклования, теории термовязкоупругости и радиационно-кондуктивного теплообмена проводится моделирование процессов возникновения ОН в граданах. Расчеты ОН в однородных заготовках (штабиках) для граданов показали хорошее совпадение с экспериментальными данными. Для ОН в граданах получено качественное согласие с данными томографических исследований.

В Приложения (А, Б) вынесены математические выкладки при выводе обобщенных соотношений для расчета контурных напряжений в условиях искривления просвечивающих лучей и вывод соотношений для алгоритмов сплайн-аппроксимации для обработки данных томографического эксперимента.

Заключение

В работе впервые комплексно исследованы проблемы, относящиеся к диагностике ОН и ОА в стержневых градиентных системах, получены новые данные о зависимостях «состав–свойство» в рядах стекол при эквимольной замене щелочей.

1. Получены обобщенные соотношения томографии напряжений с учетом криволинейности распространения лучей для реконструкции осевых ОН при поперечном просвечивании в цилиндрических объектах с произвольным градиентом ПП и разности тангенциальных и радиальных напряжений при продольном просвечивании в случае, когда РПП в градане близко к идеальнофокусирующему, а также для случая распространения винтовых (сагиттальных) лучей вдоль оси градана, ранее в теории фотоупругости не рассматривавшегося.

2. Получены обобщенные соотношения для экспресс-диагностики ОН в граданах, которые дают возможность оперативно контролировать величину осевых ОН на поверхности стержней.

3. Разработаны устойчивые алгоритмы прямой и обратной задач поляризационной томографии для различных вариантов просвечивания

градиентных стержней. На этой основе созданы рабочие компьютерные программы.

4. Реконструированы радиальные распределения всех компонентов ОН для ряда графанов на основе алюмоборосиликатных, алюмоборосиликатногерманатных и цирконосиликатных стекол, упрочненных заготовок для ОВС и лазерных стержней.

5. Разработана и апробирована методика, дающая возможность на основе данных реконструкции ОН при поперечном просвечивании графанов проводить расчеты распределения продольной ОА для отрезков графанов произвольной длины, что, в свою очередь, открывает возможности для проектирования элементов с заданным профилем ДЛП.

6. Исследованы ряды стекол, полученные из шихты при эквимольной замене щелочей ($Li \Leftrightarrow Na$) и постоянстве нещелочного состава. В исследованных концентрационных зависимостях T_g и ТКЛР в этих рядах обнаружены отклонения от аддитивности, обусловленные «эффектом двух щелочей».

7. Получены уравнения регрессии для равновесного и изоструктурного ТКЛР в исследованных рядах стекол и для параметров уравнений температурной зависимости вязкости. Показано, что значения релаксационных постоянных для всех исследованных стекол в данном ряду одинаковы в пределах погрешностей их определения.

8. Установлено, что непараболические радиальные зависимости ОН в графанах определяются нелинейными зависимостями и существенными градиентами T_g и ТКЛР по сечению графанов. Обнаружено существенное влияние термообработки на распределение и уровень ОН в графанах.

9. Подтверждена возможность использования «закона суммы» для случая ОН, возникающих в градиентных стеклянных стержнях при охлаждении через интервал стеклования.

Цитированная литература

1. **Гинзбург, В.Л.** Об исследовании напряжений оптическим методом [Текст] / В.Л. Гинзбург // ЖТФ. – 1944. – Т. 14. – № 3. – С. 181 – 192.

2. **Инденбом, В.Л.** О напряжениях на поверхности стеклоизделий [Текст] / В.Л. Инденбом // ЖТФ. – 1956. – Т. 36. – В. 2. – С. 370 – 374.

3. **Aben, H.** Integrated photoelasticity as tensor field tomography [Text] / H. Aben, K.-J. Kell // Z. Angew. Math. und Mech. – 1986. – Bd. 66. – №4. – S. T 118 – T 119.

4. **Пуру, А.Э.** Оптическая томография внутренних напряжений [Текст] / А.Э. Пуру // Механика твердого тела. – 1992. – №2. – С. 51-55.

5. **Бронфин, Ф.Б.** Фокусирующие оптические элементы с регулярным распределением показателя преломления [Текст] / Ф.Б. Бронфин, В.Г. Ильин, Г.О. Карапетян [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 1973. – Т. 18. – С. 523 – 549.

6. **Карпетян, Г.О.** Оптика градиентов. Физико-химические основы формирования градиентных оптических сред методом ионного обмена [Текст] / Г.О. Карпетян, В.Я. Лившиц, Г.Т. Петровский // Физика и химия стекла. – 1979. – Т. 5. – № 1. – С. 3 – 25.

Список основных публикаций по теме диссертационной работы

1. **Каров, Д.Д.** Моделирование термофизических характеристик градиентов [Текст] / Д.Д. Каров. // Сб. «Разработка элементов гибридных интегральных схем оптического и СВЧ диапазона». – Тула: Изд-во ТПИ, 1986. – С. 102 – 110.

2. **Каров, Д.Д.** Моделирование остаточных напряжений в ионообменных градиентных стержневых линзах [Текст] / Д.Д. Каров, В.Г. Ильин, Г.О. Карпетян // Матер. VI Всесоюзной конф. по оптической обработке информации. Ч. 2. – Фрунзе, 1986. – С. 91 – 92.

3. **Ильин, В.Г.** Об установлении начального перепада показателя преломления при высокотемпературном ионном обмене стекло – расплав соли [Текст] / В.Г. Ильин, Г.О. Карпетян, Д.Д. Каров, Н.В. Ремизов // Физика и химия стекла. – 1986. – Т. 12. – № 3. – С. 333 – 337.

4. **Каров, Д.Д.** Исследование стекол для моделирования напряжений в градиентах на dilatометре с малым измерительным усилием [Текст] / Д.Д. Каров, А.М. Мекрюков, Г.О. Карпетян // Тез. докл. IV Всес. совещания «Методы и приборы для точных dilatометрических исследований материалов в широком диапазоне температур». – Л., 1987. – С. 152 – 153.

5. **Байдаков, Л.А.** Тепловое расширение стекол системы Р – Se [Текст] / Л.А. Байдаков, Л.Н. Блинов, Н.П. Танцура, Д.Д. Каров // Физика и химия стекла. – 1989. – Т. 15. – № 2. – С. 219 – 226.

6. **Каров, Д.Д.** Анализ связи оптической анизотропии и остаточных напряжений в цилиндрических стержнях с градиентом показателя преломления [Текст] / Д.Д. Каров, А.Б. Фадеев // Матер. VII Всес. симп. по оптическим и спектральным свойствам стекол. – Л., 1989. – С. 205 – 206.

7. **Каров, Д.Д.** Интегральная фотоупругость цилиндрических структур градиентной оптики [Текст] / Д.Д. Каров, Б.В. Макушкин, С.П. Сивко // Тез. докл. IV Всес. симп. по вычислительной томографии. Ч. 1. – Ташкент, 1989. – С. 202 – 203.

8. **Каров, Д.Д.** Температурные напряжения в структурах волоконной и градиентной оптики [Текст] // Тез. докл. I Всес. научн.-технич. конф. «Проблемы измерительной техники в волоконной оптике». – Нижний Новгород, 1991. – С. 24 – 26.

9. **Каров, Д.Д.** Остаточные напряжения в заготовках для волоконных световодов [Текст] / Д.Д. Каров, С.Г. Кузуб, Б.Г. Юхнов, А.И. Иванов // Тез. докл. VII Всес. конф. по кварцевому стеклу. – Л., 1991. – С. 94–96.

10. **Каров, Д.Д.** Моделирование и исследование остаточных напряжений в кварцевых заготовках и световодах с титано-силикатными покрытиями [Текст]

/ Д.Д. Каров, С.Г. Кузуб, Б.Г. Юхнов, О.А. Ящуржинская // Тез. докл. VII Всес. конф. по кварцевому стеклу. – Л., 1991. – С. 97 – 99.

11. **Каров, Д.Д.** // Осевое просвечивание градиентов: обратная и прямая задачи интегральной фотоупругости [Текст] / Д.Д. Каров, А.Б. Фадеев, С.Н. Ушаков // Матер. V Всес. симп. по вычислительной томографии. Звенигород, 1991. М., 1991. – С. 140 – 141.

12. **Каров, Д.Д.** Остаточные напряжения в стеклянных лазерных стержнях, упрочненных ионным обменом [Текст] / Д.Д. Каров, Н.В. Никоноров, Д.А. Палагин, О.А. Щавелев, В.Ю. Яковенко, В.Е. Ермаков // Тез. докл. Межд. конф. «Лазерная оптика-93». Т. 2. СПб., 1993. – С. 228 – 230.

13. **Каров, Д.Д.** Оптическая томография напряжений в стеклянных цилиндрических стержнях с упрочняющими слоями [Текст] / Д.Д. Каров // Матер. VII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. СПб., 2003. – Труды СПбГПУ. Фундамент. исследования в технических университетах. – СПб.: СПбГПУ, 2003. – С. 236 – 239.

14. **Каров, Д.Д.** Интегральная фотоупругость и остаточные напряжения полимерных цилиндрических структур градиентной оптики [Текст] / Д.Д. Каров, А.Б. Фадеев // Матер. V Всес. конф. по полимерным оптическим материалам. – Л., 1991. – С. 97– 98.

15. **Поликарпов, Ю.И.** Автоматизированная установка для измерения комплексного коэффициента теплового расширения полимеров методом модуляционной дилатометрии [Текст] / Ю.И. Поликарпов, А.И. Слуцкер, Д.Д. Каров, А.О. Белаш, И.И. Аленичев // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С. 139 – 145.

16. **Каров, Д.Д.** Оптическая томография внутренних напряжений в цилиндрических фазовых объектах [Текст] / Д.Д. Каров, А.Э. Пуро // Труды СПбГПУ. – № 500. – СПб.: Изд. СПбГПУ, 2006. – С. 237 – 246.

17. **Пуро, А.Э.** Тензорная томография остаточных напряжений [Текст] / А.Э. Пуро, Д.Д. Каров // Оптика и спектроскопия. – 2007. – Т. 103. – № 4. – С. 698 – 703.

18. **Каров, Д.Д.** Магнитооптическая томография тензорных полей [Текст] / Д.Д. Каров, А.Э. Пуро // Высокие технологии и фундаментальные исследования. Т. 3. Сб. трудов X Междунар. научно-практич. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». 9 – 11 дек. 2010 г., Санкт-Петербург, Россия; под. ред. А.П. Кудинова. – СПб.: Изд. Политехнич. ун-та, 2010. – С. 251 – 257.