Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное агентство по образованию

Санкт–Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики



В.П.Вейко

Опорный конспект лекций по курсу «Физико–технические основы лазерных технологий» Раздел «Новые лазерные технологии»

ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ



Санкт–Петербург 2008 Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико–технические основы лазерных технологий». Тема: Лазерное формирование микрооптических элементов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 133 с.

Для студентов специальностей «Лазерная техника и лазерные технологии», «Физика и техника оптической связи», бакалавров и магистров направлений «Оптотехника», «Техническая физика», «Фотоника и оптоинформатика».

Курс также может быть полезен инженерам, ученым, маркетологам, менеджерам, которые интересуются применением лазеров в микрооптике, для понимания преимуществ и ограничений использования лазеров в этой области, для расширения и углубления их знаний в области процессов лазерной обработки и для будущей работы.

Рекомендовано УМО по оптическому образованию в качестве учебного пособия для обучения студентов по специальности 200201 «Лазерная техника и лазерные технологии».



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

- © Санкт–Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2008
- © В.П. Вейко, 2008.

Предисловие

Настоящее учебное пособие является первой частью курса лекций «Физико–технические основы лазерных технологий», раздела: «Новые лазерные технологии», неоднократно прочитанных автором как для российских студентов, так и для многочисленных аудиторий студентов и специалистов в США, Германии, Италии, Японии, Китае, Индии в период с 1996 г по 2006 г.

Конспект является также одним из первых опытов такого рода для автора на русском языке, т.к. он составлен по стандартам, принятым в основном за границей, т.е. он содержит все иллюстрации к курсу, основные исходные данные, положения и выводы, в т.ч. всю формализованную информацию (формулы, таблицы, графики, рисунки и т.п.). В то же время, пособие содержит минимум текста и в этом смысле не заменяет ни учебников, ни курса лекций. Конспект предназначен для того, чтобы облегчить и помочь освоению лекционного курса.

Этот курс освещает новое направление в изготовлении оптических компонентов с помощью мощного нестационарного и заданным образом сформированного в пространстве оптического (лазерного) облучения. Рассмотрены различные физические явления, приводящие к получению специфических изменений структуры и оптических свойств стеклообразных материалов (СТОМ), такие как: денсификация пористых стекол, аморфизация стеклокерамики, микроструктурные изменения и сверхзакалка оптических стекол, лазерное плавление, абляция и испарение стекол. Приведены характеристики лазерного и оптического оборудования, необходимые для реализации этих процессов. Описаны конструкции и параметры оптических компонентов, изготовленных при помощи лазерной технологии.

Заметим, что «Лазерное формирование микрооптических элементов» впервые рассматривается в таком объеме и в едином монографическом издании и во многом основано на личном опыте автора и лаборатории кафедры лазерных технологий СПбГУ ИТМО, возглавляемой им, до сих пор эти вопросы были отражены только в периодической печати и то лишь частично.

Содержание

1. ВВЕДЕНИЕ. Краткий обзор технологий и применений микрооптики.

2. ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (ЛТ-МОЭ).

- Общая физическая картина
- Принципы процессов ЛТ-МОЭ
- Общее описание оборудования и технологии

3. ОСНОВНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

- «Мягкое» лазерное нагревание стекол и стеклообразных материалов (СТОМ)
- Денсификация пористых стекол
- Аморфизация стеклокерамики и кристаллизация стекла
- Сверхзакалка и структурная модификация оптических стекол
- Микроформообразование в вязко-текучей фазе
- Лазерное испарение-абляция стекла
- Лазерное оборудование для производства микрооптических компонентов
- Сравнение различных методов ЛТ–МОЭ

4. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ И ПОЛИМЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСИМЕРНЫХ И ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ

5. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЙ

- Формирование оптических элементов на торцах оптических волокон: медицинских инструментов, элементов ввода-вывода, ближнепольных оптических зондов
- Лазерная асферизация: принципы и техника

6. ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТЕКЛЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (прямое действие лазерного облучения на вязкость стекла, «лазерная варка» стекла)

7. ПЕРСПЕКТИВЫ ЛТ-МОЭ

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее стабильных тенденций в современной электронике и фотонике является миниатюризация. Открытие полупроводниковых транзисторов в середине XX века вызвало появление новых направлений в информационных системах, технологиях и процессах и привело к развитию микроэлектроники.

Недавний прогресс в создании полупроводниковых лазеров и волоконной оптики приводит информационное сообщество на грань подобного скачка в микрооптике и фотонике. Развитие микрооптики стимулируется в настоящее время следующими основными причинами:

1. Прогрессом информационных технологий для оптической связи и кабельного телевидения, оптической записи и хранения данных, оптической диагностики в сложных технологических процессах и конструкциях, в медицине и биологии, в которых последнее время все больше и больше применяются волоконно-оптические системы.

2. Развитием линейных и матричных полупроводниковых лазеров, и волоконных лазеров мощностью 100-1000 Вт и более, и их применением в промышленности, медицине, экологии и т.д. (вместо He- Ne, YAG:Nd, и других типов лазеров).

3. Широким применением волоконно-оптических систем для доставки мощного лазерного излучения по оптическим каналам и для формирования фронта излучения в медицине и промышленности.

4. Прогрессом микросистемной техники, которая включает в себя микро-опто-электромеханические компоненты в интегрированных конструкциях.

5. Развитием интегральных оптических систем (фотонных чипов), которые состоят из большого числа специальных микрооптических компонентов, таких как: волноводы, оптические соединители, геодезические линзы, специальные дифракционные элементы и т.д.

6. Развитием технологии оптических растров, которые активно применяются в лазерной литографии, ксерографии, печати, кино и других визуальных оптических системах.

оптическая связь

- оптическая память

- микроскопия

оптическая запись информации

- кабельное телевидение

– оптические сенсорные системы

- оптическая звуко- и видеозапись

- эндоскопические медицинские системы

- ближнепольные оптические приборы

- оптоэлектронные компьютеры

- оптические компьютеры

– микросистемная техника
– оптические процессоры

- медицинские оптические инструменты для

микрохирургии, терапии, диагностики

системы накачки твердотельных лазеров
волоконная доставка лазерного излучения

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРООПТИКИ (перечень основных направлений)

- волоконно-оптические сети в экологии, медицине и др.

формирующая и фокусирующая оптика для линеек и матриц

полупроводниковых и волоконных лазеров

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА МОЭ

Все упомянутые области применений микрооптики требуют новой, более разнообразной и функционально более полной компонентной базы, которую невозможно изготовить традиционными методами оптических технологий. Главный недостаток традиционной химикомеханической оптической технологии — низкая производительность, сложность контроля и автоматизации — ставят ее на грань искусства и отодвигают на одно из последних мест по мере уменьшения размеров элементов. Именно поэтому в наши дни появилось так много новых методов для изготовления новых микрооптических элементов: ионно-молекулярный обмен, диффузионное сплавление, фотолитография, лучевые (лазерные, электронные, ионные) технологии и т.д. Все они имеют свои достоинства и недостатки.

Заметим попутно, что термин «микрооптика» применяется нами (как это обычно принято в литературе (см. например монографию N.F.Borelly. Microoptics technology, Corning, New York, 2000) в расширительном смысле и правильнее было бы говорить о методах для изготовления мини, микро– и нанооптических компонентов. Так или иначе в курсе будут рассмотрены методы и приведены примеры изготовления оптических элементов с размерами от единиц мм до десятков нанометров.

Сравнение основных методов изготовления микрооптических приведены в таблице 1 и 2.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРООПТИКИ

Таблица 1

Технология про-	Материалы	Диаметр, мкм	Числовая	Применения	
изводства			апертура		
Механическая	Стекло, плавленый	Более 700	0.01–0.9	Формирование изо-	
	кварц, полимеры			бражения, волоконная	
				оптика, оптика для	
				технологических лазе-	
				ров	
Резка оптического	Стекло	Более 100	0.01–0.9	Волоконная оптика	
волокна					
Выборочное	Стекло, полимеры	от 900 до 1500	0.1–0.6	Формирование изо-	
сплавление				бражения	
Фотолитография	Полимеры	Более 100	0.025–0.6	Интегральная оптика	
Лучевая техноло-	Стекло, плавленый	Более 100	0.01–0.8	Интегральная оптика	
гия (электрон-ион)	кварц				
Лазерное химиче-	Стекло, плавленый	Более 100	0.1–0.9	Формирование изо-	
ское травление	кварц			бражения	
Лазерная техно-	Стекло, плавленый	Более 100 (CO ₂ -	0.01–0.6	Волоконная оптика,	
логия	кварц, стеклообраз-	лазеры), менее		оптика для технологи-	
	ные материалы, по-	10 (эксимерные		ческих и медицинских	
	лимеры	лазеры)		лазеров	

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОЛИНЗ

Таблица 2

Технология	Лазерная технология		Выборочное сплавление		Ионно-обменная техно- логия	
МОЭ- конструкция	grad n	grad n	grad ni		grad n	- grad n
Длина волны, мкм	0.63; 0.78	0.63; 0.78	0.78	0.63	0.63; 0.78	0.63; 0.78
Оптический зрачок, мм	0.5–3.0	0.5–3.0	3.0-4.0	4.0–5.0	1.0–3.0	1.0–1.5
Эффективность зрачка, %	90	90	60–80	75	80	_
Толщина, мм	0.8–1.5	0.8–1.2	3.6–4.2	1.3	4.0	_
Заднее фок. расстояние	2.5–12.0	1.0–8.0	2.7–5.4	11.2	3.3	1.5–20.0
Волновая абер- рация	_	_	λ/4	λ/4	λ/4	_
Место изготов- ления	ИТМО, LASERTEX, Россия		SELFOC, США		Nippon Sheet Glass Co., Япония	

ПОЧЕМУ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ?

Основные требования к микрооптическим компонентам:

1) высокая точность*)

2) высокое оптическое разрешение (малое расстояние между точками, высокое качество изображения)*)

- 3) широкий диапазон значений числовых апертур (до самых высоких)*)
- 4) необходимое фокусное расстояние*)
- 5) высокое пропускание (малые потери) в широком диапазоне длин волн
- 6) воспроизводимость
- 7) серийность
- 8) надежность

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОГУТ УДОВЛЕТВОРИТЬ БОЛЬШИНСТВУ ИЗ ЭТИХ ТРЕБОВАНИЙ:

- БЛАГОДАРЯ БОЛЬШОМУ ЧИСЛУ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МАТЕРИАЛОВ, КОТОРЫЕ МОГУТ БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАНЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ И КОНТРОЛЕ МОК, И
- БЛАГОДАРЯ ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА И КОНТРОЛЯ, И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ, КОТОРАЯ МОЖЕТ ОБЕСПЕЧИТЬ ВЫСОКУЮ ТОЧНОСТЬ, ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

^{*)} численные значения требований 1, 2, 3 и 4 могут сильно отличаться в зависимости от конкретных применений — от того, какие именно функции выполняют МОЭ — изображающие, согласующие или перераспределяющие световые потоки.

ОГРАНИЧЕНИЯ КУРСА

ЛАЗЕРНЫЕ МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ В РАЗЛИЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

- ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ
- ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ОСОБЕННО В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ
- ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
- ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЧИПОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УФ-ЛАЗЕРОВ

ОДНАКО НАИБОЛЕЕ ШИРОКО ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЯЮТСЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИНЗОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТЕКЛА И СТЕКЛООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЧЕМУ И БУДЕТ УДЕЛЕНО ОСНОВНОЕ ВНИМАНИЕ В ПРЕДЛАГАЕМОМ УЧЕБНОМ ПОСОБИИ

2. ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

ОБЩАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА

Возможность производства МОЭ воздействием лазерного излучения на оптические стекла и стекловидные материалы базируется на термическом цикле локального нагревания - охлаждения. Этот процесс должен быть управляем в объеме материала и во времени воздействия. Локальный нагрев приводит к изменению формы поверхности и формирует новую микроструктуру с переменной плотностью и различными значениями показателя преломления *п* в облученной зоне. Форма поверхности и локальная плотность материала d(r,z) зависит от локальной температуры T(r, z, t) и от значения скоростей нагрева и охлаждения ($\partial T/\partial t$). В свою очередь T, $\partial T/\partial t$, а также grad T определяются величиной плотности мощности лазерного излучения q(r,t) (Вт/см²), а также оптическими (*R*, α) и теплофизическими (*k*, *a*, *c*) характеристиками среды



q(r,t) ⇒ T(r,z,t) ⇒ h(r,z) d(r,z) Сечение образца стеклообразного материала во время воздействия лазерного излучения

- 17 -ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЙ В ОБРАЗЦЕ СТЕКЛА ПОСЛЕ ЛОКАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Имея в виду локальное управляемое термическое воздействие, оптимальным будет такой лазер, излучение которого сильно поглощается в стеклах и СТОМ. Таковым является СО₂—лазер, длина волны которого 10.6 мкм попадает в полосу фундаментального поглощения практически всех стекол и СТОМ.

Таким образом, с помощью цикла СО₂–лазерного нагревания– охлаждения можно изготовить градиентные линзы с различными диаметром, формой поверхности и оптической силой. Результаты такого действия однозначно определяются физическими процессами, которые сопровождают локальный нагрев и быстрое охлаждение стекла.



ВОЗМОЖНОЕ СЕЧЕНИЕ ОБРАЗЦА СТОМ ПОСЛЕ ЛОКАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ. 1–1' — ИСХОДНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ; 2–3'(1') — МЯГКОЕ ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СРЕДУ (ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СТЕКЛА СВЕРХЗАКАЛКОЙ), АМОРФИЗАЦИЯ СТЕКЛОКЕРАМИКИ; 3–1'(2') — УПЛОТНЕНИЕ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ; 3–1' — ИСПАРЕНИЕ СТЕКЛА (объяснения см. ниже по тексту)

ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Основные физические процессы в диапазоне фундаментального поглощения стекла (10.6 мкм):

- нагрев;
- локальное тепловое расширение и деформация поверхности;
- размягчение аморфных или плавление поликристаллических сред;
- вязкое течение под действием сил поверхностного натяжения (и иногда под действием гравитации и др. механических сил);
- термомеханические напряжения, инерция стекла;
- закалка.

Эти процессы приводят к изменению показателя преломления и/или формы поверхности (образование линзоподобных зон в стеклах и СТОМ) благодаря следующим явлениям:

- сверхзакалке оптического стекла (3);
- изменению микроструктуры стекла (ИМ);
- аморфизации стеклокерамики (А);
- денсификации и усадке пористых стекол и покрытий (Д);
- сплавлению одинаковых и различных типов оптических стекол (С)
- микроформообразованию в вязко-текучей фазе под действием поверхностного натяжения или других механических сил (в т.ч. лазерная полировка поверхности) (М);
- абляции и испарению стекла при высокой интенсивности излучения



Схема основных физических процессов в стекле под действием лазера и основные технологические процессы ЛТ-МОЭ

- 19 -ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ЛТ-МОЭ

1. Мягкое нагревание $q < q_{исп}, V_{H;o} = \frac{\partial T}{\partial t} < V_{kp}$

q — поглощенная плотность мощности лазерного излучения, *V*_{кр} — критическая скорость нагревания (остывания), при которой еще не происходит разрушения образца во время (*V*_H) или после (*V*_o) окончания воздействия вследствие остаточных термомеханических напряжений. Мягкий нагрев характерен для технологических режимов Д, А, М

2. Жёсткое нагревание

$$q < q_{\text{исп}}, V_{\text{H;o}} > V_{\text{кр}}$$

Приводит к растрескиванию образца в процессе воздействия или после его окончания, возможно использовать для резки стекла или отделения линз путем управляемого термораскалывания стекла

3. Испарение

 $q > q_{\text{исп}}$

для термостойких стекол V_{исп} < V_{кр}



Типичные режимы лазерного нагрева стекол и СТОМ.

1-1' — оптимальная кривая.

2–2' — зоны жесткого нагрева и охлаждения, где термомеханические напряжения могут привести к появлению разрушения вследствие термоупругих (при нагревании) или остаточных (после остывания) напряжений.

3–3' — сверхмягкое охлаждение, которое может вызвать кристаллизацию и отжиг структуры.

ПРИНЦИПЫ ЛТ-МОЭ

ПЕРВЫЙ ПРИНЦИП ЛТ-МОЭ

ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖЕЛАЕМОГО РЕЖИМА ЛТ-МОЭ НЕОБХОДИМО КОНТРОЛИРОВАТЬ:

- ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ (В ПРОСТЕЙШЕМ СЛУЧАЕ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ) *q*(*t*)
- ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ *q*(*r*) И

ДЛЯ ЭТОГО ДОСТАТОЧНО КОНТРОЛИРОВАТЬ:

- ТЕМПЕРАТУРУ ОБРАЗЦА, Т
- СКОРОСТИ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ $\partial T/\partial t$

-21-БАЗОВАЯ СХЕМА ОБОРУДОВАНИЯ

–CO₂ – CO₂–лазер, импульсно-частотный или непрерывный, стабилизированный по мощности;
–O – оптическая система для управления параметрами пучка, содержащая оптический модулятор, который управляет длительностью воздействия;

сканирующую систему для контроля распределения энергии в прперечном сечении и фокусирующую линзу; **He–Ne** – ФП система наблюдения оптических параметров в процессе изготовления в соответствии с характеристиками волнового фронта излучения от дополнительного (пробного) источника (He–Ne или полупроводниковый лазер, волоконно-оптический источник и т.д.), которое проходит через МОЭ на фотоприемник (ФП);

-СТОМ – образец материала и оснастка (КСт);

-ПК – компьютер для контроля работы всего комплекса. Могут быть реализованы другие методы контроля этого процесса формирования МОЭ:

 используя микропирометр и компьютер, регистрируют температуру и скорость нагрева-охлаждения в облученной зоне;

– используя CCD–камеру, сравнивают форму преломляющей зоны с заданной (эталонной), проецируют на экран ТВ приемника или записывают на видеоносителе.



Принципиальная схема лазерной установки для производства МОЭ

ПРИНЦИПЫ ЛТ-МОЭ

ВТОРОЙ ПРИНЦИП ЛТ-МОЭ

ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ПО ТОЧНОСТИ, ДИАПАЗОНУ ЧИСЛОВЫХ АПЕРТУР, ФОКУСНОМУ РАССТОЯНИЮ, ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ, СЕРИЙНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ, А ИНОГДА ТАКЖЕ ПО ОПТИЧЕСКОМУ РАЗРЕШЕНИЮ И ПРОПУСКАНИЮ (см. стр. 13)

НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ МОЭ ВПЕРВЫЕ В ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ ЛИНЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛО ВОЗМОЖНЫМ РЕАЛИЗОВЫВАТЬ

ОПТИЧЕСКУЮ ОБРАТНУЮ СВЯЗЬ

ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ

КОТОРАЯ СПОСОБНА ОБЕСПЕЧИВАТЬ ТОЧНОСТЬ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ПРОЦЕССА

ГЛАВНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ЛТ-МОЭ

1. ВЫСОКАЯ ТОЧНОСТЬ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ БЛАГОДАРЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

2. ВЫСОКАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ БЛАГОДАРЯ КОРОТКОМУ ВРЕМЕНИ ПРОЦЕССА (ВРЕМЯ ПРОИЗВОДСТВА БОЛЬШИНСТВА МОЭ 1-60 СЕК)

3. ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ БЛАГОДАРЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

4. ВОЗМОЖНОСТЬ МИНИМИЗАЦИИ РАЗМЕРА МОЭ ДО 10 МКМ (В НЕКОТОРЫХ СЛУЧАЯХ ДО 100 НМ) С ПОМОЩЬЮ СО₂–ЛАЗЕРОВ В СТЕКЛЕ; ДО 0.1–1 МКМ С ПОМОЩЬЮ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА В ПОЛИМЕРАХ И СТЕКЛАХ

5. ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОМАТЕРИАЛОВ БЛАГОДАРЯ ВЫСОКИМ СКОРОСТЯМ НАГРЕВА-ОХЛАЖДЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЬЮ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПОМ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА

3. ОСНОВНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

– 25 – МЯГКОЕ ЛАЗЕРНОЕ НАГРЕВАНИЕ (МЛН)

$(q < q_{исп}, V_{H,O} < V_{кр})$ ПРЕДПОСЫЛКИ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В МЛН-РЕЖИМЕ

Параметры МОЭ однозначно зависят от показателя преломления *n* (где *n* является функцией плотности *р*) и кривизны поверхности *R*.

 ρ и *R* зависят от температуры *T* и скорости нагрева-охлаждения $\partial T/\partial t$

T и $\partial T/\partial t$ определяются интенсивностью лазерного излучения и ее пространственно-временным распределением q(r, t)

Таким образом:

1. Показатель преломления n однозначно зависит от распределения интенсивности лазерного излучения q(r) и дозы облучения (экспозиции) q(t)

2. Физические процессы, происходящие во время МЛН во всех СТОМ:

- локальное тепловое расширение и деформация
- изменение микроструктуры
- плавление или размягчение
- 3. Оптические материалы, используемые для МЛН:
 - оптические стекла
 - технические стекла
 - стеклокерамика, и т.д.
- 4. Специфические физико-технологические процессы, происходящие в разных СТОМ при МЛН:
- 1) денсификация пористых стекол,
- 2) микроформообразование в твердой фазе за счет теплового расширения,
- 3) модификация микроструктуры,
- 4) аморфизация стеклокерамики,
- 5) сверхзакалка стекла,
- 6) сплавление (сварка) стекол,
- 7) микроформообразование в вязко-текучей фазе, в т.ч. при воздействии внешних механических сил (на торцах оптических волокон).

МИКРОПИРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ *T*, $V_{H,O} = \partial T / \partial t$

ТИП ПИРОМЕТРА: БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ИНФРАКРАСНЫЙ ЦИФРОВОЙ МИКРОПИРОМЕТР ЧАСТИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ПАРАМЕТРЫ:

– СПЕКТРАЛЬНЫЙ ДИАПАЗОН: ОТ 5.7 ДО 8.7 мкм

- ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН: ОТ 200 ДО 2000⁰С
- ДИАМЕТР ОБЪЕКТА: ОТ 0.5 ДО 5 мм
- ВРЕМЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ < 0.1 s
- ТОЧНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ: ±10⁰С

Позволяет измерять локальные термодинамические температуры СТОМ–объектов, а также в составе компьютеризированного комплекса темп их нагревания и остывания ∂*T*/∂*t* (град/с).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

- 1. Микропирометрический (*T*, ∂*T*/∂*t*)
- 2. Микроинтерферометрический (nd)
- 3. Микропрофилографический
- 4. Микрооптические измерения п
- 5. Метод наклонной полировки (косых шлифов



Схема микроинтерферометра для исследования стеклянных пластинок, обработанных лазером:

1 — Не–Nе лазер, 2 — телескоп, 3 — расщепитель пучка, 4 — микроскоп, 5 — камера, 6 — зеркало - 28 -ПРОЦЕСС ЛАЗЕРНОГО ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА СТЕКЛА

1. Режим поверхностного натяжения ($P_{\sigma} > P_{rp}$) — термическое расширение и структурные из- 1 $P_{\sigma} < P_{rp}$ менения в объеме определяют показатель преломления (объемные изменения $\Delta V/V \approx 3-4 \cdot 2 P_{\sigma} \approx P_{rp}$ 10^{-2}), поверхностное натяжение определяет форму поверхности.

$$\left(\boldsymbol{P}_{\sigma} \approx \boldsymbol{P}_{rp}, \boldsymbol{P}_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \boldsymbol{g}}}\right)$$

характерен для реализации фазовых переходов: (аморфизациякристаллизация) и переходных состояний (размягчение– отвердевание, плавление– остывание, переход через температуру стеклования) 3. Гравитационное течение в режиме закалки ($P_{\sigma} << P_{rp}$). Гравитационные силы, поверхностное натяжение и вязкость определяют форму поверхности, $\Delta n/n \approx 10^{-2}$.



Режимы МЛН стекла, его температурные условия (см. стр. 19) и соответствующие режимам 1, 2, 3 изменения формы поверхности (слева), *Р* — удельные силы (давления), *P*_о — поверхностного натяжения, *P*_{гр} — гравитации.

СТАДИЯ, КОНТРОЛИРУЕМАЯ ТЕРМИЧЕСКИМ РАСШИРЕНИЕМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ НАТЯЖЕНИЕМ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ДВОЯКОВЫПУКЛОЙ ЛИНЗЫ



Температурные кривые МЛН в стадии терморасширения q = 1.3 Вт/мм², $d_0 = 2$ мм $h_0 = 1$ мм



Изменение параметров деформируемой зоны в течение стадии терморасширения



Схема и параметры деформации в течение стадии терморасширения:

1 — сферическая зона, контролируемая поверхностным натяжением

2 — переходная зона, контролируемая термическими напряжениями

3 — исходная зона

СТАДИЯ, КОНТРОЛИРУЕМАЯ ТЕРМИЧЕСКИМ РАСШИРЕНИЕМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ НАТЯЖЕНИЕМ (ДВОЯКОВЫПУКЛЫЕ ЛИНЗЫ) (2)



Изменение физических параметров (ΔV/V – фактор объемного уплотнения, n — показатель преломления)



Изменение оптических параметров (F — фокусное расстояние, NA — числовая апертура)

- 31 -СТАДИЯ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ (СВТ) ПЛОСКО-ВОГНУТЫЕ, ДВОЯКОВОГНУТЫЕ ЛИНЗЫ



Температурные кривые МЛН во время СВТ $q = 1.3 \text{ Вт/мм}^2$, $d_0 = 2 \text{ мм}$, $h_0 = 1 \text{ мм}$



Изменение параметров деформируемой зоны во время СВТ



Схема и параметры деформации в стадии вязкого течения.

1а — сферическая зона, контролируемая поверхностным натяжением,

1b — асферическая зона, контролируемая силой тяжести и поверхностным натяжени-ем,

2 — переходная зона, контролируемая термическими напряжениями,

3 — исходная зона

СТАДИЯ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ (СВТ) ПЛОСКО-ВОГНУТЫЕ, ДВОЯКОВОГНУТЫЕ ЛИНЗЫ (2)



 $(\Delta V/V - фактор объемного уплотнения,$ *n*— показатель преломления)



- 33 -ОПТИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО ЛИНЗ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ В РЕЖИМЕ МЛН



ZYGO–ИНТЕРФЕРОГРАММА ОДНОЙ ЛИНЗЫ (ИЗ РАСТРА)

МЯГКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ НАГРЕВ (МЛН) ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В РАЗНЫХ ТИПАХ СТЕКОЛ

1. ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ДВОЯКОВЫПУКЛЫЕ ЛИНЗЫ С ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ОТ 10 ДО 100 мм, ДИАМЕТРОМ D = 0.2–10 мм И ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ ДО 0.04. ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ КОРОТКОФОКУСНЫХ ЛИНЗ ОКОЛО 10 мкм.

2. ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ВЫПУКЛО-ВОГНУТЫЕ ЛИНЗЫ С ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ОТ 30 ДО 150 мм, ДИАМЕТРОМ D = 0.5–10 мм И ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ ДО 0.05.

3. ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ДВОЯКОВОГНУТЫЕ ЛИНЗЫ В КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ И ЛИНЗОВЫЕ РАСТРЫ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ.

4. ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ВЫСОКОАПЕРТУРНЫЕ ЛИНЗЫ С ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ОТ 1 ДО 100 мм, ДИАМЕТРОМ D = 0.2–10 мм И ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ ДО 0.5–0.7.

5. ПЛОСКИЕ ГРАДИЕНТНЫЕ ЛИНЗЫ С ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ ОТ 20 ДО 50 мм, ДИАМЕТРОМ D = 1–3 мм.

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВСЕХ МЕТОДОВ ОЧЕНЬ ВЕЛИКА. ВРЕМЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ОТ 1 СЕКУНДЫ ДО НЕСКОЛЬКИХ МИНУТ.

ДЕНСИФИКАЦИЯ ПОРИСТЫХ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ ВИДЫ ПОРИСТЫХ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ (ПС) 1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОРИСТЫХ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ МЕТОДОМ «ЗОЛЬ–ГЕЛЬ» И ИХ СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Последовательность процессов спекания геля силикат- VI. ного стекла в печи и лазерной денсификации и соответствующие структурные характеристики.



Структурные характеристики до и после лазерного уплотнения зольгелевого силикатного стекла Вида

2. СЕЛЕКТИВНОЕ ТРАВЛЕНИЕ ОКИСЛОВ НАТРИЯ И БОРА ИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО (ОКОННОГО) НАТРИЙ–БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА (НБС ~ 5% Na₂O–15% B₂O₃–80% SiO₂) ОСНОВНЫЕ СТАДИИ

- 36 -


СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

ПОРИСТОСТЬ (ОБЪЕМ ПОР) — m = 0.15–0.7 ДИАМЕТР ПОР — $d_0 \approx 1$ –10 нм (SG) $d_0 \approx 10^2$ –10⁵ нм (LG) ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ — $n \approx 1.22$ –1.33±0.005





Зависимость плотности (а) показателя преломления (б) пористого гелевого кварца от температуры денсификации

$$n_{\rm PG} = n_{\rm SiO} - m(n_{\rm SiO} - 1)$$

Схема пористого вытравленного стекла и распределение показателя преломления после лазерной денсификации

ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ЛАЗЕРНОЙ ДЕНСИФИКАЦИИ

а). Показатель преломления n однозначно зависит от плотности ρ : $n = f_1(\rho)$

b). Плотность ρ однозначно зависит от распределения температуры: $\rho = f_2[T(r,z,t)]$

с). Распределение температуры T(r,z,t) однозначно зависит от распределения интенсивности лазерного излучения q(r,z) и длительности воздействия q(t): $T(r,z,t) = f_3[q(r,z)]$

Таким образом:

1. Распределение показателя преломления n(r,z) однозначно зависит от распределения интенсивности лазерного излучения q(r,z)

n(r,z) = F[q(r,z,t)]

2. Параметры ПС после денсификации эквивалентны параметрам кварцевого стекла

коэффициент преломления
$$n_{PG} = n_{SiO}$$
, прозрачность $\tau_{PG} = \tau_{SiO}$

3. Выбор пористости *m*, диаметра пор и исходного показателя преломления зависят от диапазона длин волн, оптической задачи и т.д.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЙ ДЕНСИФИКАЦИИ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ (1)



Схема денсификации

движение фронта спекания в пористом стекле под действием лазерного излучения Глубина уплотненного слоя может быть рассчитана из:

$$W_{\alpha} = -\alpha \frac{dS}{dt} = W_{\eta} = 2\eta \left(\frac{\delta \varepsilon}{\delta t}\right)^2 V$$

 W_{α} — работа сил поверхностного натяжения, $\Delta S_{(m)}$ — изменение площади поверхности при денсификации,

α — коэффициент поверхностного натяжения стекла,

*W*_{^η} — работа сил вязкого трения силикатной матрицы,

 $\eta(T) = A \cdot \exp(-T^*/T)$ — вязкость силикатной матрицы,

 $\epsilon(m)$ — относительная деформация образца,

V(*m*) — объем деформируемой зоны.

- 40 -ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЙ ДЕНСИФИКАЦИИ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ (2)



ЭКСПЕРИМЕНТ



Общий вид зоны денсификации в процессе лазерного воздействия с экрана ТВ-приемника

⁽⁷⁾ кциональная схема лазерной установки денсификации ПС (а) и система обратной связи (б): 1 — лазер, 2 — затвор, 3 — оптическая система, 4 — сканер, 5 — заготовка, 6 — держатель, 7 — система обратной связи, 8 — осветитель, 9 — линза, 10 — монитор, 11 — ТВ-приемник, 12 — видеомагнитофон, 13 — электронный блок.

ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОЭ НА БАЗЕ ПС







Зависимость геометрических параметров (h₁, D, R₁) МОЭ от длительности воздействия т (схема 1).





Зависимость оптических параметров $(d_1, f_1, NA = D/2f)$ МОЭ от длительности воздействия, $q \sim 2 \cdot 10^2$ Вт/см² (схема 2)

$$f' = \frac{R_2}{n_2 - n_1}$$



Геометрическая схема (2) денсифицированной зоны после шлифовки усаженной поверхности

МИКРООПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ (МОЭ), СФОРМИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА БАЗЕ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ

N⁰	Форма (конструк-	Название	Конструктивные и оптические параметры (мм)							
	ция)		t	<i>d</i> ₁	f'	NA = d/2f'	<i>N</i> = ЛИН/ММ			
1	2	3	4	5	6	7	8			
1		Преломляющий отрицательный МОЭ (асфериче- ский)	1.0–2.0		1.0–80.0					
2		Отражающий МОЭ (асферический)	1.0–2.0	0.5–3.0	0.13–5.0					
3		Преломляющий положительный МОЭ	1.0–2.0	0.5–3.0	2.5–15.0	0.1–0.125	60–250			

МИКРООПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ (МОЭ), СФОРМИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА БАЗЕ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ

1	2	3	4	5	6	7	8			
4		Двойной прелом- ляющий МОЭ (асферический)	1.6–2.5	0.5–2.0	1.5–8.0	0.2–0.5	120–350			
5		МОЭ из сфериче- ского и цилиндри- ческого элементов	1.6–2.5	0.5–2.0	1.5–10.0	0.2–0.45	100–350			
6		Мягкая диафрагма	1.0–2.0	0.02–5.0	Лучевая прочность 10 ⁻¹⁰ Вт/см ² , <i>t</i> – 10 с					

ВОЗМОЖНЫЕ И РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОЭ НА ПС

1. Интегральные системы для волоконо-оптических коннекторов

NA = d/2f

Na_{max} = 0.47 (двусторонние асферические компоненты)

2. Астигматические системы для симметризации и коллимации излучения полупроводниковых лазеров, и для волоконнооптических коннекторов (коэффициент передачи энергии — 0.6)





 4 — интегральный микролинзовый растр
 5 — стеклянная решетка с отверстиями для волоконных световодов

(технология мягких диафрагм)

Схема различных микро-волоконно- оптических компонентов.



ВОЗМОЖНЫЕ И РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОЭ НА ПС

3. Изображающие оптические растры, матрицы, корректоры распределения энергии и т.д.

Такие интегральные компоненты производятся со следующими типичными параметрами:

- оптический зрачок элемента d = 0.4 мм
- фокусное расстояние f = 10.0 мм
- расстояние между элементами р = 0.5 мм
- коэффициент заполнения апертуры c_f = 0.8
- количество элементов n = 100
- время изготовления t < 10 мин



Оптический растр, изготовленный методом лазерной денсификации ПС, размер 5х5 мм, время изготовления менее 1 мин.

- 47 -ВОЗМОЖНЫЕ И РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОЭ НА ПС

4. Изображающая оптика, объективы для оптической записи (малого веса) и эндоскопов, фронтальные линзы для микрообъективов и т.д.

- оптическое разрешение —
- 300–350 мм⁻¹ (λ = 0.63 мкм)
- оптический зрачок 0.5 мм
- фокусное расстояние 1.2 мм
- числовая апертура 0.42



- $F_{c\phi} = R/\Delta n, \text{ NA}_{c\phi} \approx R/F \approx \Delta n$ $\Delta n = n_{SiO_2} - n_{\Pi c} \le 0.24$
- NA_{дв} = $2NA_{c\phi} = 2\Delta n \le 0.48;$ $n_{exp(ac\phi)} \approx 0.52$



Кружок рассеяния (круг Аббе) двойной асферической изображающей линзы на основе пористого кварцевого стекла

- 48 -ВОЗМОЖНЫЕ И РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОЭ НА ПС

5. Лучестойкая мягкая диафрагма для излучения импульсного пико- и фемтосекундного импульсного лазера

- диаметр *d* = 0.1–2 мм
- лучевая прочность $q_{\text{пор}} = 10^5 10^6 \text{ Вт/см}^2$
- время изготовления 10 с

6. Плоские (и канальные подповерхностные) световоды

- ширина 0.3–1.0 мм
- глубина 0.05–0.2 мм
- $n = n_1 n_2 = 0.1 0.2$

Схема лучестойкой диафрагмы (слева) и фотография прошедшего света (справа)

D, d, h





ФОРМИРОВАНИЕ КАНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛНОВОДОВ



ZYGO–ИНТЕРФЕРОГРАММА ПОВЕРХНОСТИ ВОЛНОВОДНОГО КАНАЛА

ДРУГИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И БУДУЩЕЕ РАЗВИТИЕ МОЭ НА ПС

Лазерная денсификация оптических пленок:

- SiO₂-TiO₂ для волноводов,
- WO₃ электрохромное покрытие
- TiO₂ длинно-фокусные линзовые растры)
- пропитка ПС солями тяжелых металлов, которые увеличивают показатель преломления денсифицированной зоны. Пропитка Сг позволяет увеличить NA двойных асферических линз до 0.52. Теоретически, соли Pb и Ва позволяют увеличить NA одиночной линзы до 0.8
- поверхностная и сквозная герметизация пор для стабилизации и развязки параметров МОЭ, поверхностная денсификация сложных волоконнооптических шайб для формирования изображений (космические технологии)
- заглубленные волноводы для производства 3мерных оптических соединений, благодаря сфокусированному лазерному излучению на других длинах волн (не 10.6 мкм как было выше для ПС)



Зависимость усадки от падающей плотности энергии для WO₃ покрытий (градации серого в шкале обеспечивают качественную цветовую индикацию режимов)

- 51 -АМОРФИЗАЦИЯ СТЕКЛОКЕРАМИКИ (СК)

Обычно, стеклокерамика — не подходящий материал для оптических компонентов из-за сильного рассеяния света в оптическом диапазоне длин волн. Это результат высокой степени структурной кристаллизации, которая сопровождает традиционные технологии ее изготовления. Представляет интерес рассмотреть возможность локальной аморфизации стеклокерамики. Такую возможность дает контролируемый во времени лазерный нагрев.

ПРЕДПОСЫЛКИ ЛАЗЕРНОЙ АМОРФИЗАЦИИ

а) стеклокерамика представляет собой сложную композицию окислов, состоящую частично из кристаллической ($N_{\rm kp}$) и частично из аморфной ($N_{\rm am}$) фаз, степень кристаллизации и аморфности $N_{\rm kp}/N_{\rm am}$ зависит от температуры *T* и скорости нагрева-охлаждения $\partial T/\partial t$

 $N_{\rm kp}/N_{\rm am} \sim f_1 \ (T, \ \partial T/\partial t)$

б) оптическое рассеяние СК уменьшается, а пропускание света увеличивается при повышении степени аморфизации, глубина аморфизованного слоя h_{am} зависит от T, $\partial T/\partial t$

 $\tau \sim f_2 (N_{\kappa p}/N_{am}), h_{am} \sim f_2 (T, \partial T/\partial t)$

в) показатель преломления *n* и grad *n* зависит от *T*, $\partial T/\partial t$

n, grad n ~ f₃ (T, ∂T/∂t) **Таким образом:**

1. Оптическая прозрачность τ и показатель преломления п однозначно зависят от распределения интенсивности q(r,z) и дозы q(t)лазерного излучения

 $\tau, \ n \approx F\{T[q(r,z,t)]\}$

- 52 -СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ





Рентгеновские дифрактограммы образцов 1 (слева) и 2 (вверху): (а) — исходная структура, (б) — после лазерного облучения (аморфизация) и (в) —после вторичного облучения (частичная кристаллизация). 2 — Пики 1.688; 2.496 А соответствуют рутилу (α -TiO₂), другие — кордиериту (2 MgO · Al₂O₃ · 5 SiO₂), 3.505 — SiO₂ - подобному твердому раствору

3 — степень кристаллизации $N_{\mbox{\tiny Kp}}/N_{\mbox{\tiny am}}$ до (a) и после (b) лазерного излучения



Дисперсионная кривая (а) и спектр пропускания (б) оптически прозрачной после лазерной аморфизации стеклокерамической пластинки толщиной 0.3мм

Общий вид линзы (а) и профилограмма (б) трех оптических линз из растра, изготовленных в стеклокерамике методом локальной лазерной аморфизации (V_{am} , V_{kp} — удельные объемы соответственно аморфной и поликристаллической фаз).

- 54 -ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЗ



Зависимость фокусного расстояния (1 – экспериментальная, 2 – теоретическая при $\rho = \rho_0$) и радиуса кривизны линзы (3) от времени облучения (а); и рассчитанная зависимость фокусного расстояния от радиуса кривизны линзы (б) при α = 1.02, ρ_0 = 2702 кг/м³, *n* = 1.58, *d* = 6 · 10⁻⁴ м.



МПФ — на оси линз, сформированных в течение: а — t = 8 c; б t = 20 c на 487 нм (кривая 1), на 505 нм (кривая 2), на 591 нм (кривая 3), кривая 4 — дифракционный предел на длине волны 550 нм.

МПФ — это модуль ОПФ — оптической передаточной функции (зависимость контраста передачи изоьражения *T* от пространственной частоты ν (мм⁻¹) объекта), обычно используется для характеристики качества визуальных оптических систем

- 55 -МИКРОЛИНЗОВЫЕ РАСТРЫ И ФОТОГРАФИИ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИХ ПОМОЩЬЮ



3х3 микролинзовый растр, изготовленный методом лазерной аморфизации (CO₂ - лазер) стеклокерамики марки CT–50–1, $q = 2.8 \cdot 10^2$ BT/cm², $2R_0 = 3$ мм, h = 0.6 мм, среднее фокусное расстояние $\overline{F} = 27$ мм, $\Delta F = 3\%$, NA ≈ 0.25 , размер пятна в фокусе ~ 20 мкм, возможные радиусы кривизны $2R_0 = 50$ мкм – 5 мм

Фотографии, полученные с помощью линзового растра 3х3

АСТИГМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЛИПСОИДАЛЬНЫЕ ЛИНЗЫ



Схематический зрачок эллипсоидной астигматической линзы *F*₁ = 12.2 мм, *F*₂ = 30.6 мм

 $F = f(R, \sigma, \rho_0/\rho, g)$



ПЛОСКИЕ КАНАЛЬНЫЕ СВЕТОВОДЫ



Схема (а) и фотография сечения (б) светопроводящего канала, сформированного лазерной аморфизацией ситалла СТ–50–1.

Зависимости а — ширины (кривая 1) и глубины (кривая 2) светопроводящего канала; б — максимальной высоты светопроводящего канала над поверхностью ситалловой пластинки — от скорости сканирования при *r* = 0.75 мм и *p* = 9 Вт.

ЛОКАЛЬНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ТІ- СОДЕРЖАЩИХ СТЕКОЛ ПРЕДПОСЫЛКИ

Если V_{ст} << V_{кр} = 10² К/мин (при сверхмягком охлаждении), в зоне рекристаллизации наблюдаются следующие оптико–физические явления



Фотографии аморфизованных (1) и кристаллизованных (2–4) зон одной и той же стеклокерамики марки CT–50–1 (SiO₂–Al₂O₃–CaO– MgO–TiO₂).

На графиках — зависимости мощности лазерного излучения *P* и пропускания τ от времени воздействия *t* соответствующих образцов при лазерном облучении.



Временная зависимость коэффициента пропускания τ и температуры *T* стеклокерамических пластинок во время импульсного облучения, 9 Вт СО₂–лазером; длительность импульсов воздействия 10 с, частота 0.05 Гц, *h* = 0.3 мм, *R*₀ = 1 мм. Таким образом, можно наблюдать зависимость τ от *T* нагревакаждого образца. Чем больше *T*, тем меньше амплитуда τ , из-за уменьшения времени лазерного нагрева для кристаллизации.

АМОРФИЗАЦИЯ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ВОЗМОЖНЫЕ И РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

- МИКРОЛИНЗОВЫЕ РАСТРЫ
- ОПТИЧЕСКИЕ «ОКНА» ПРОЗРАЧНОСТИ
- НЕСФЕРИЧЕСКИЕ ЛИНЗЫ
- ПЛАНАРНЫЕ СВЕТОВОДЫ
- ИНТЕГРИРОВАННЫЕ, АПОДИЗИРОВАННЫЕ И «МЯГКИЕ» ДИАФРАГМЫ
 - ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, МОДУЛЯТОРЫ

• ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ НА ОСНОВЕ СИТАЛЛОВ (ТІ-СОДЕРЖАЩИЕ СТЕКЛЯННЫЕ ПЛЕНКИ) И ФОТОСИТАЛЛОВ

- СЛОЖНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРООПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ, ВКЛЮЧАЮЩИЕ В СЕБЯ ОПТИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ, ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ЛИНЗЫ, ОКНА И Т.Д.
- НОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МИКРОМАТЕРИАЛЫ С НЕОБЫЧНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ (АМОРФНЫЙ Al₂O₃) И СПЕКТРАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

СВЕРХЗАКАЛКА И СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ПРЕДПОСЫЛКИ УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ *n* ОТ ПЛОТНОСТИ СТЕКЛА ρ И ТЕМПЕРАТУРЫ *T* В УПРУГОЙ ЗОНЕ: $\vec{n}(r, z, t) = \rho[T(r, z, t)]$
- ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ *п* И МИКРОСТРУКТУРЫ (ПЛОТНОСТИ ρ) ОТ МАКСИМАЛЬНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА *T*_{max} И ОТ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ *V*_{охл} В ЗОНЕ ЛИКВАЦИИ
- БОЛЬШАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ ТИПИЧНЫХ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СТЕКЛА ПАРАМЕТРАХ:
 - ТЕМПЕРАТУРА $T \sim 500-600^{\circ}$ С И БОЛЕЕ
 - ВРЕМЯ НАГРЕВА $t_{\rm H} \sim 1-10$ с, ВРЕМЯ ОХЛАЖДЕНИЯ $t_{\rm oxn} \leq 10$ $t_{\rm H}$
 - СКОРОСТЬ НАГРЕВА $V_{H} \le 0.5 \cdot 10^{-3}$ K/c, СКОРОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ $V_{0xn} \le 0.5 \cdot 10^{-2}$ K/c
 - ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГРАДИЕНТЫ $\partial T/\partial r \sim 10^2 10^3$ K/cm

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЗАКАЛКЕ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ

I. Локальное тепловое расширение и деформация поверхности – разрыхление «структуры», появление термоупругих напряжений, уменьшение показателя преломления – все процессы обратимы в упругой зоне I, формообразование подобно тому, как это происходит при МЛН; частичное «замораживание» структуры и формы поверхности (обратные показателю преломления *n* факторы).

II. Дополнительные явления: неупругое деформирование происходит благодаря вязкому течению размягченного стекла; значительный вклад структурного компонента при быстром остывании от температуры $T_{\text{ниж}}$ (нагрев до $T_{\text{ниж}}$), значительный вклад термомеханического фактора при быстром охлаждении от $T_{\text{верх}}$ (нагрев до $T_{\text{верх}}$)



Зоны нагрева:

I. Зона обратимого изменения коэффициента преломления (упругая зона зона Гука)

II. Зона структурных изменений – критическая зона – температурный диапазон, где при остывании от нижней температуры зоны II *Т*_{ниж} появляются остаточные оптические эффекты и при остывании от верхней температуры зоны II *Т*_{верх} наблюдаются максимальные изменения оптических свойств

III. Зона ликвации.

ОПТО–ТЕРМООПТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НЕОДНОРОДНЫЙ НАГРЕВ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ КАК НЕЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР (преобразует grad T в grad n





Изменения показателя преломления в некоторых активных стеклах, легированных Nd : 1 — силикатное стекло марки GLS–1, 2 фосфатное стекло GLS–22, *T*₁₃ — температура, соответствующая вязкости стекла 10¹³ Пуаз. Схема преобразования температурного распределения в поперечном сечении стержня в изменение показателя преломления.

ПРИМЕНЕНИЯ: КОРРЕКЦИЯ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ЛАЗЕРНЫХ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ИЗ СТЕКЛА С Nd

Термооптически искаженный стержень





$$T(r,t) = \frac{qr_{0}}{2\alpha} + \frac{q(r_{0}^{2} - r^{2})}{4k} - \frac{qr_{0}^{2}}{k} \exp\left(\frac{\mu^{2}at}{r_{0}^{2}}\right)$$

$$T(r,t) = \frac{qr_0}{k} \left[2\frac{at}{r_0^2} - \frac{1}{4} \left(1 - 2\frac{r^2}{r_0^2} \right) \right]$$

оптическая разность хода $\Delta_{V} = I \frac{dn}{dt} \Delta T(r)$; обе $n(r) \sim \Delta T(r)$ зависимости (T(r) и $\Delta_{V}(r)$) - параболические болические Интерферограммы предварительно термически обработанного в режиме II стеклянного стержня до (а) и во время воздействия оптической накачки со средними мощностями 75 Вт (б), 150 Вт (в), 315 Вт (г). Можно пронаблюдать этапы коррекции: движение зоны компенсации термооптических искажений



ПРИМЕНЕНИЯ: КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ

Коррекция п оптических компонентов



Диаграмма формирования профиля показателя преломления, полученного во время закалки градиентного образца под действием неоднородного в поперечном сечении температурного поля:

А — исходный профиль; В, С — профиль после закалки.

1—4 — кривые, соответствующие изменению показателя преломления в соответствующих радиальных точках; $\Delta_1 - \Delta_4$ — то же самое при воздействии повышенной температуры.

Лазерная асферизация микролинз



диапазон уменьшения значений *п*:



Схема лазерной асферизации микролинз (а), сферические аберрации снижаются (б)

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ (ТЛС) (СВАРКИ) СТЕКОЛ

ПРЕДПОСЫЛКИ ТЛС-РАЗМЯГЧЕНИЯ СТЕКОЛ (С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ η ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ *Т* И ГЛУБИНЫ СПЛАВЛЕНИЯ ОТ η, *T*)



МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СПЛАВЛЕНИЯ Разные или одинаковые типы стекол K₂O–Na₂O–B₂O₃–SiO₂ кроны K₂O–Na₂O–BaO–ZnO–B₂O₃–SiO₂ K₂O–PbO–SiO₂ флинты



Вид зависимости глубины сплавления от времени лазерного воздействия $\tau_{cпл}$ $q < q_{ev}, V_{H,C} < V_{cr}$ — режим МЛН

ПРИМЕНЕНИЯ

ВЫСОКОАПЕРТУРНЫЕ МИКРОЛИНЗЫ И МИКРОЛИНЗОВЫЕ РАСТРЫ (СМОТРИ ПОЗИЦИИ 5-8 РИСУНКА ПРЕДЫДУЩЕЙ СТРАНИЦЫ)

АХРОМАТИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ (п.7, рис. стр. 65) И РАСТРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СТЕКОЛ

ГИПЕРСФЕРИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ (п.3, рис. стр. 65)

ОПТИЧЕСКИЕ СФЕРЫ (п.4, рис. стр. 65)

ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКОННЫЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ (ДО 7:1)



Фоконный тип



Линзовый тип

ПРИМЕНЕНИЯ: ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ



Фотографии стадий образования геодезической линзы методом лазерного сплавления стекол (вверху), ее геометрическая схема и оптические параметры (внизу)



$$F = \frac{R^2}{2h}$$

ИСПАРЕНИЕ-АБЛЯЦИЯ ТЕРМОСТОЙКИХ СТЕКОЛ ПРЕДПОСЫЛКИ: ПРЯМОЕ УДАЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА (подобно алмазной полировке, но не резцом, а сфокусированным пучком света)



По Френкелю, скорость испарения V_{ucn} зависит от температуры $V_{ucn} = B \cdot \exp(-T^*/T)$, где T^* — энергия активации испарения по шкале Кельвина, тогда

 $h_{\text{исп}} \sim F\{T(q(r,t)]\}$

Замечание

- Чтобы уменьшить «расплавленную массу» и размер зоны размягчения, необходимо предотвратить образование жидкой фазы после окончания воздействия лазера
- Необходимо ограничивать скорость нагревания *T*(*t*) для снижения термоупругих напряжений

МАТЕРИАЛЫ

Термостойкое стекло (кварцевое) (КТР ~ 10⁻⁵–10⁻⁶ K⁻¹) или другие стекла с предварительным нагревом





Схема лазерного испарения с цилиндрической поверхности



Удаленная масса (*m*, мг) как функция скорости сканирования лазерного пучка:

$$h_{\min} < rac{m_{\min}}{
ho I_{\Sigma} d_{\Sigma}} = 0.7$$
 МКМ

 $I_{\Sigma} \sim 30$ мм — длина обработанной зоны $d_{\Sigma} \sim 4$ мм — ширина обработанной зоны $\rho = 2.5 \cdot 10^3$ г/см³ — плотность кварца





Схема двух видов цилиндрических компонентов (а, б) и законы сканирования

ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ИСПАРЕНИЕМ-АБЛЯЦИЕЙ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Форма (конст-	Наарациа	Конструктивные и оптические параметры, мм							
рукция)	Пазвание	t	d ₁	d ₂	f'	NA = d/2f'	<i>N</i> = ЛИН/ММ		
1	2	3	4	5	6	7	8		
d1 t 1=2.0-50.0 mm	цилиндрический микрооптический элемент	1.5–4.0	0.5– 6.0	_	1.0– 6.0	0.25–0.5	200–400		
R ₂ d t t t t t t t t t t t t t t t t t t	оптическая система, состоящая из двойных цилиндрических микроопти- ческих элементов, ориентировааных взаимно перпендикулярно	2.0–4.0	0.5– 6.0	_	0.5– 3.0	0.5–1.0	350–450		
1=10.0-40.0,P=0.2-4.0 mm	Оптический растр с элементами, ори- ентированными взаимно перпендику- лярно элементу (асферическому)	2.0–5.0	0.2– 4.0	_	4.0– 30.0	_	_		

ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ИСПАРЕНИЕМ—АБЛЯЦИЕЙ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
	оптический куб — двусторонняя сис- тема для симметризации и коллима- ции	2.0– 6.0	0.5– 5.0	0.5– 5.0	0.5– 10	0.4– 0.8	
	мягкая диафрагма (1) сердцевина оптического волокна (2) полимерное покрытие (3)	0.05– 5.0	интенсивность пучка — 10-10 ³ Вт/см ²				

-72-ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ИСПАРЕНИЕМ-АБЛЯЦИЕЙ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

(продолжение)

- 1. Оптический соединитель для ввода излучения полупроводниковых лазеров в волокно
- 2. Коллиматор для накачки твердотельных лазеров
- 3. Коллиматор излучения по «быстрой» оси для мощных линеек полупроводниковых лазеров
- 4. Цилиндрические линзы: положительные, отрицательные, сферические и асферические
- 5. Растры цилиндрических линз: положительных, отрицательных, сферических и асферических
- 6. Гомогенизатор для эксимерных и твердотельных лазеров
- 7. Многолинзовые модули
- 8. Оптический делитель для соединения мощных лазеров с волокном
- 9. Микропризмы и отражающая микрооптика для преобразования пучков


- 73 -ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЛИНЗЫ

Технические параметры:



Материал:	кварцевое стекло
Поверхность:	сферическая
Расчетная длина волны:	800 нм
Погрешность поверхности:	λ/10
Качество поверхности	MIL 40–20
Показатель преломления:	1.453317 ± 0.0001
Максимальное заполнение:	> 95%
Фокусное расстояние:	± 3%
Апертура:	± 0.01 мм

Contraction of the second

Оптические параметры цилиндрических линз (λ_{рассч} = 800 нм)

Фокусное расстоя-	Радиус,	стрелка прогиба	апертура,	числовой фокус	размеры,
ние, мм	ММ	ЛИНЗЫ, ММ	MM	F/A	ММ
0.06	0.025	0.025	0.05	1.21	12 x 1 x 1
0.18	0.080	0.041	0.14	1.36	12 x 1 x 1
0.30	0.140	0.042	0.20	1.47	12 x 1 x 1
2.20	1.000	0.020	0.40	5.54	12 x 1 x 1
4.40	2.000	0.010	0.40	11.04	12 x 1 x 1
13.20	6.000	0.013	0.80	16.55	12 x 1 x 1
44.00	20.000	0.006	1.00	44.12	12 x 1 x 1
77.00	35.000	0.006	1.30	59.39	12 x 1.3 x 1
99.00	45.000	0.034	3.50	28.37	12 x 3.5 x 1
132.00	65.000	0.026	3.50	37.82	12 x 3.5 x 1

ГОМОГЕНИЗАТОРЫ



Гомогенизация с помощью растра цилиндрических линз

Гомогенизация двумя растрами

ОПТИЧЕСКИЙ КОМПОНЕНТ (СТЕРЖНЕВАЯ (ROD) ЛИНЗА)

 $d_1 \approx 2\text{--}3 \text{ mm}$ $f'' \approx 4.0\text{--}6.0 \text{ mm}$ $S_f \approx 2.5\text{--}4.0 \text{ mm}$



Фотография (а) и рисунок (б) стержневой линзы, изготовленный лазерным двусторонним испарением стекла.

двухсторонний цилиндрический линзовый растр (фотография)



ВОЗМОЖНЫЕ И РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

- АСФЕРИЧЕСКИЕ (С КРУГЛЫМ ЗРАЧКОМ) ЛИНЗОВЫЕ РАСТРЫ ДЛЯ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ
- ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ АСФЕРИЧЕСКИЕ ЛИНЗЫ И ЛИНЗОВЫЕ РАСТРЫ ДЛЯ СИММЕТРИЗАЦИИ И КОЛЛИМАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ, ЛИНЕЕК И МАТРИЦ ИЗ НИХ
- СПЕЦИАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ОПТИЧЕСКИЕ КУБЫ, ТРАПЕЦИОИДЫ И Т.Д.
 - МЯГКИЕ ДИАФРАГМЫ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СБОРОК, ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
 - ПРОИЗВОДСТВО МАСТЕР-ФОРМ ДЛЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ЛИНЗОВЫХ РАСТРОВ

- 78 -ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ



Основные параметры установки:

Мощность лазерного излучения: *P* = 2–60 Вт Частота сканирования: *F* = 0.1–150 Гц Длительность воздействия: τ = 0.1–600 с Размер обрабатываемой зоны: *d*₀ = 50 мкм–50 мм

ИЛЛЮСТРАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБРАТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ



Аг-ионный непрерывный лазер облучает изготавливаемую с помощью СО₂-лазера, микролинзу: на экране можно наблюдать картину изменения оптических параметров МОЭ и с помощью фотоприемника использовать ее в системе обратной связи.

Фотография фрагментов экспериментальной установки с оптической обратной связью в действии

ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ



Схемы некоторых типов экспериментальных установок для производства МОЭ: 1 — излучение CO₂—лазера, 2 — оптика (ZnSe, или Ge линза, *F*' = 150 мм), 3 — электро-механический сканер, 4 — образец, 5 — вращающийся стол, 6 — ХҮ–координатный стол, *F*' — фокальная плоскость линзы.

ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ



Схема экспериментальной установки (США, Линкольновская лаборатория) для изготовления кварцевых растров методом лазерной абляции.

1 — СО₂–лазер, 2 — линейный поляризатор, 3 — круговой поляризатор, 4 — затвор, 5 полевая диафрагма, 6 — фокусирующая линза, 7 — точечная диафрагма, 8 — коллимирующая линза, 9 — фокусирующая линза, 10 — образец кварцевого стекла, 11 — х, у координатный стол.

Основные параметры установки:

 P_L = 12–25 BT τ = 1–3 c d_0 = 1.3 MM $(q = 2.7 \text{ kBT/cm}^2)$

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (методом экспертных оценок^{*)})

Тип лазерной	і Характеристики метода										
технологии	Термона-	Пу-	Качест-	Стабиль-	Возмож-	Возмож-	Ограни-	Количе-	Производи-	Сум	Me-
	пряжения	зырь-	во по-	ность	ность	ность	чения	СТВО	тельность	ма	СТО
		КИ	верхно-	СВОЙСТВ	измере-	полной	оптиче-	пригод-		бал-	
			СТИ	во вре-	ния в	автомати-	ских ха-	ных		лов	
				мени	процессе	зации	рактери-	оптиче-			
					ИЗГОТОВ-		стик NA,	СКИХ			
					ления		F, D	мате-			
	<u> </u>			-			0	риалов		0.0	5.0
денсифика-	3	6	5	6	2	3	3	6	4	38	5-6
ция пористых											
	1	5	1	2	6	Б	1	Б	2	20	56
Аморфиза-	4	5	4	2	0	5	4	5	5	50	5-0
Структурная	5	3	3	4	4	4	5	3	2	33	3
молифика-	Ŭ	Ŭ	Ŭ			т	Ŭ	Ŭ	<u>ک</u>	00	Ū
ция оптиче-											
ских стекол											
Сверхзакал-	6	2	2	5	5	6	6	4	1	37	4
ка оптиче-											
ских стекол											
Формообра-	2	4	1	3	1	1	2	1	5	20	1
зование при											
размягчении											
стекла											
Формообра-	1	1	6	1	3	2	1	2	6	23	2
зование аб-											
ляцией стек-											
ла											

^{*)}Примечание: Номера в таблице расположены в порядке предпочтительного использования; наилучшая технология занимает 1–е место (имеет наименьший номер 1), наихудшая занимает 6–е место (№6).

НЕКОТОРЫЕ ВИДЫ ДЕФЕКТОВ: ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЯ И ТРЕЩИНЫ



Линии термонапряжения в гиперсферической линзе, сформированные методом лазерного сплавления на плоской подложке; изображение получено с помощью поляризованного лазерного света. Термомеханические (усталостные) трещины, появившиеся в частях плоского волновода–мультиплексора, сформированного методом лазерной денсификации пористых кварцевых стекол.

НЕКОТОРЫЕ ВИДЫ ДЕФЕКТОВ: ВОЗДУШНЫЕ ПУЗЫРИ



Пузыри, появившиеся в МОЭ в процессе лазерного сплавления: а) внутри линзы, б) на поверхности линзы

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРООПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЛТ-МОЭ	КАК ИЗБЕЖАТЬ ЭТИХ ПРОБЛЕМ
Термоупругое разрушение	Ограничение скорости нагрева ниже предела растрес- кивания стекла (это сравнительно просто, т.к. они на- блюдаются во время процесса), используя предвари- тельный нагрев.
Усталостное разрушение вследствие остаточных напряжений	Ограничение скорости охлаждения: выбор надлежа- щего типа лазерной технологии
Появление пузырей	Ограничение скорости нагрева-охлаждения, выбирая тот или иной процесс, когда это необходимо, исполь- зование предварительного и послеоперационного по- догрева и т.п.
Волнистость поверхности	Создание условий, когда поверхностное натяжение может формировать более гладкую поверхность.

В ЧАСТНОСТИ, ПРЕДЛАГАЕТСЯ НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МОК

4. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ И ПОЛИМЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСИМЕРНЫХ И ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРОВ

1. АБЛЯЦИЯ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА ВУФ–УФ МУЛЬТИВОЛНОВЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Сформированный УФ (λ = 308 нм) лазерный пучок (~ 1 Дж/см²) осуществляет локальную абляцию



АСМ^{*)}–ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСПАРЕННОГО КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА



(а) ВУФ–УФ (308 нм) мультиволновое возбуждение

(б) 266 нм (4-я гармоника Nd:YAG лазера)

2.2 Дж/см², 60 импульсов

^{*)} АСМ – атомно-силовая микроскопия

- 89 -АБЛЯЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ (LIPAA) ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СХЕМА LIPAA



Схема экспериментальной установки



Металлическая мишень: обычно серебро Расстояние между образцом и мишенью — от нескольких десятков мкм до нескольких мм.



Эксимерный или

Проекционный метод



АСМ–изображение микроканавок, сформированных в кварцевом стекле



248 нм, 1.3 Дж/см², 40 импульсов, *d* = 200 мкм

3. ОБРАБОТКА СТЕКЛА F₂–ЛАЗЕРОМ



б) после абляции (сравнить c a))

Генерация кольцевых структур (в) с использованием Френелевская линза, воздушного пузырька как маски (а) и абляции под изготовленная на действием F₂-лазера стекле кварцевом

лазерной методом абляции

- 92 -4. ТЕХНОЛОГИИ НА БАЗЕ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ





а) б) Поверхности поликарбоната, структурированные KrF лазером с помощью метода отражающих масок. а) решетки, б) пирамиды.



Типичная проекционная система с эксимерным лазером

а) б) Микрооптические поверхности, сформированные КrF лазером и методом дрожащих масок. а) ИК оптический кристалл иодид цезия, б) поликарбонат.

5. ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПММА С ПОМОЩЬЮ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА





Изменение показателя преломления УФ–лазерное формирование облученного полиметилметакриалата интегрального оптического волновода (плексигласа) ПММА (λ = 193 и 248 нм, / в полимерном чипе = 17 мДж/см²

Линейный волновод в полимерном устройстве

5. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЙ

- 95 -ПРОИЗВОДСТВО ТОРЦЕВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (ТВОЭ)

КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ: МИКРОФОРМООБРАЗОВАНИЕ ВО ВРЕМЯ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА (1)

N⁰	Эскиз рабочей схемы	Форма ТВОЭ
1	Неподвижный пучок и вращающееся волокно, режим на-	
	грева а) () () () () () () () (Плоский торец Закругленный торец Сферический торец
2	Неподвижный или сканирующий пучок, вращение волокна и поступательное движение волоконного торца, режим на- грева	различные асферические линзы

Основные схемы микроформообразования ТВОЭ.

МИКРОФОРМООБРАЗОВАНИЕ ВО ВРЕМЯ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА (2)



Основные схемы микроформообразования ТВОЭ.

- 97 -**PACYET TBOЭ**





Теоретическая модель линзы на конце волокна.

аналитическая модель (а), 1 — зона преломления, 2 — зона полного внутреннего отражения

теоретические каустики сферических (выпуклая форма) (б) и эллиптических (в) линз на конце волокна





85

СХЕМА УСТАНОВКИ С ОБРАТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ ПО ЧИСЛОВОЙ АПЕРТУРЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТВОЭ



1 — Не–Ne лазер, 2, 4 — элементы оснастки ТВОЭ для закрепления волокна и ввода/вывода излучения He–Ne лазера, 3 — волокно, 5 — производимый оптический компонент, 6 — экран в плоскости регистрации, 7 — интерференционный фильтр для исключения теплового облучения, 8 — фотодиод, 9 — лазер с затвором, 10 — управляющая система

УПРАВЛЯЕМОСТЬ ЛАЗЕРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИНЗ НА КОНЦЕ ВОЛОКНА



рической линзы d_{sp} (d_f — диаметр волокна R_{ef} (радиус ближайшей сферы) мкм от час-400 мкм) от скорости поступательного движе- тоты вращения со об/мин, d_f = 400 мкм ния V мм/с: экспериментальная точка и теоретическая кривая $d_{sp} = (1.5 d_f^2 \rho)^{1/3}$ (длина расплавленной части волокна)

Зависимость относительного диаметра сфе- Зависимость эффективного радиуса линзы

СХЕМА УСТАНОВКИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО МЕЖСОЕДИНЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОГЛАСУЮЩИХ ТОРЦЕВЫХ ЛИНЗ



1 — управляющая система, 2 — фотодиод, 2' — интерференционный фильтр, 3–5 — механические узлы, обеспечивающие вращение длинного волокна (4) вокруг оптической оси, 6 производимый компонент, 7 — оптически согласуемое волокно, 8 — ввод для излучения Не– Ne лазера (10), 9 — CO₂–лазер с затвором

ФОТОГРАФИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТВОЭ



механические узлы для сдвига волокна

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТВОЭ

Вид ТВОЭ	ОЭ Время произ-апертура		овая Тура	Размер фоку	Потери, %	
	водства, мин	Экспер.	Teop.	Экспер.	Teop.	
	0.3–0.5	0.47	0.49	320	300	2–3
дуговая линза						
	1–2	0.38	0.4	530	600	5
сферическая линза						
эллиптическая линза	1–2	0.44	0.46	440	390	5
	1.5–2.5	0.35	0.4	570	640	10
«боковая» линза						

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ВЫВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ТОРЦЕВЫХ ЛИНЗ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ (а) И ФОТОГРАФИИ ИЗГОТОВЛЕННЫХ ТОРЦЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ (б)



НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ТИПЫ ТВОЭ: СХЕМЫ (а) И ФОТОГРАФИИ (б)

1. Отклоняющие компоненты



«Боковая» линза

2. Рассеивающие компоненты

двусторонний



hire you

односторонний

3. Проецирующие оптические компоненты

Дуговая линза



a)









- 105 -НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ТИПЫ ТВОЭ И СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ИМ УГЛЫ РАСТВОРА ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА (ВДОЛЬ ОСИ)

а) односторонний фокусирующий компонент, б) двусторонний рассеиватель, в) двойная сферическая линза





Эффективность передачи энергии через оптические межсоединения (расчет):а) оптическая схема модуля, б) зависимость эффективности от воздушного зазора *d*, в), г) зависимость эффективности от угла наклона подвижной детали относительно верхней поверхности линзы (в) и центра линзы (г)

– 107 – ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ



Эксперимент.

а) схема волоконного соединителя, б) зависимость эффективности от диаметра микролинз D, мм; в), г), д) — зависимость эффективности от поперечной z, мм (в), осевой x, мм (г) сдвигов угла поворота α⁰ (д).

– 108 – ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛОКОННЫХ ТОРЦЕВЫХ ЛИНЗ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

			Эффективность соединения с различными ТВОЭ		
N	Вид соединения	Схема системы	Плоский торец	Дуговая линза	Асфери- ческая (эллипти- ческая) линза
1	InGaAs, GaAs диодные лазеры — 200 мкм волокно	[] S = 100 x 0.5 мкм	56%	70%	-
2	YAG:Nd лазер, волоконный вы- ход 420 мкм λ = 1.064 мкм — 200 мкм волокно	$\frac{\text{YAG: Nd}}{d_{\partial}/d_{\phi}} = 5$	6.5%	15%	35–70%
3	YAG:Но лазер, волоконный вы- ход 420 мкм λ = 2.08 мкм — 200 мкм волокно	$ \begin{array}{c} \text{YAG: Ho} \\ \text{Ho} \\ \text{d}_{\partial}/d_{\phi} = 5 \end{array} $	6%	15%	33–60%

Некоторые результаты тестов волоконно-оптических торцевых компонентов
ЛАЗЕРНАЯ АСФЕРИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

ДЛЯ ЧЕГО ? —

Чтобы решить целый ряд проблем при создании оптических приборов, которые на данный момент неразрешимы, в частности в:



– 109 –

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ФАКТОРЫ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО ИСПАРЕНИЯ–АБЛЯЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ



НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИСПАРЕНИЯ-АБЛЯЦИИ

a) Зависимости глубины воздействия h (1) и высоты "гребня" ∆h (2) после лазерного формообразования или после лазерного «разглаживания» (3) от скорости сканирования V_{ск}

б) Зависимость поглощательной способности А для СО₂–лазера (10.6 мкм) в кварцевом стекле от угла падения (А₀ — поглощательная способность для нормального луча)



НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО ИСПАРЕНИЯ-АБЛЯЦИИ

Осаждение продуктов лазерной абляции, два механизма:

1. Испарение SiO₂ в виде отдельной молекулы:

 SiO_2 (жидкость) \Rightarrow SiO_2 (газ)

2. Термическая диссоциация молекулы SiO₂:

SiO₂ (жидкость) \Rightarrow SiO₂ (газ) + 1/2 O₂

2А. SiO pearupyet с O_2 или H_2O (пар)

2 SiO + O₂ = 2 SiO₂ \Downarrow (конденсация)

2В. Сплавление осажденного SiO_2 при T $\sim 1400^0 \text{C}$

Термомеханические напряжения, возникающие в процессе лазерного удаления

Критерий релаксации разрушающих термоупругих напряжений:

 $\frac{q_{H}}{V_{c\kappa}} < \frac{
ho c T_{ts}}{2} \frac{h_{0}^{2}}{r_{0}^{2}}$, где $q_{H} = q_{
m norn} - LV_{
m e}$ — часть

от *q*_{погл} затрачивается на выделение тепла, *L* —удельная теплота испарения, *V*_e скорость испарения, *LV*_e — часть от q_{погл} затрат, пошедшая на испарение

Литература: V.P.Veiko, E.B.Yakovlev. Physical fundamentals of laser forming of microoptical components. Opt. Eng., v.33, N 11, p.3567–3571, 1994.

– 113 – НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ АСФЕРИЗАЦИИ



Изменения б), е) в цилиндрических оптических компонентах типа а), д) формирование и изменение их оптических свойств — линейной апертуры *D* и фокусного расстояния *f* от числа проходов лазерного пучка *n*.

– 114 – РОЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Гидродинамическое течение «расплава« вызвано действием реактивного импульса отдачи пара и/или действием поверхностных сил натяжения. Последний фактор особенно заметен на шероховатой (грубой) поверхности с малым шагом шероховатостей, когда поверхностное натяжение (в случае малых радиусов кривизны пиков шероховатостей) стремится выровнять поверхность.

Существует противоречие между требованиями к точности лазерной обработки и к качеству поверхности.

Действительно, те же самые явления, которые ведут к удалению материала толщиной h, приводят к размягчению стекла толщиной h_s и к появлению волн и гребней с высотой ∆h.



Схема процесса разглаживания стекла путем сканирования сканирующим источником: $\Delta h = \frac{h_m^2}{2\mu l^2} T_{max} \frac{d\sigma}{dT} \ln \frac{T_{max}}{T}$

*T*_{max} — температура плавления, μ — вязкость

КОМБИНИРОВАННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Суть концепции состоит в разделении функций между: микроформообразованием под действием лазерного испарения-абляции и разглаживанием под действием высоко концентрированного теплового источника.

Идеи разглаживания заключаются в следующим:

 нагревание поверхности стекла до определенной температуры и в течение времени, когда снижение вязкости стекла дает возможность поверхностному натяжению реализовать его естественное стремление минимизировать поверхностную энергию и, соответственно, площадь поверхности
 обеспечение эквивалентных скоростей сканирующего источника и движения гребня (аналог очистки полупроводников от примесей и дефектов методом зонной плавки)

$$V_{_{\mathrm{CK}}} \leq \frac{h}{\mu} \frac{dT}{dz}$$



Фотографии цилиндрических образцов после лазерного формирования, а) и после дополнительного разглаживания плазменной струей б)

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РАЗГЛАЖИВАНИЯ — ПОЛИРОВКИ СТЕКЛЯННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОГО ИСПАРЕНИЯ–АБЛЯЦИИ (методом экспертных оценок^{*)})

Параметры	Произ- води-	Качество поверх-	Простота	Надеж- ность	Стоимость оборудова-	Стоимость линз	Σ
Технология	тель-	ности			ния		
разглажива-	НОСТЬ						
ния							
Н ₂ –плазма	2	2	2	1	1	2	12
Вытяжка	1	3	3	3	2	1	13
Лазер	3	4	1	2	3	3	16
Электронный луч	4	1	4	4	4	4	21

*) пояснение к методу экспертных оценок см. стр. 82

КОМБИНИРОВАННАЯ ЛАЗЕРНО–ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛИРОВКИ СТЕКЛА



Схема комбинированного метода формирования оптической поверхности управляемой лазером струей плазмы

Структура плазменной струи

ФОТОГРАФИЯ ЛАЗЕРНО–ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ



ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АСФЕРИЗАЦИИ





Изменение скорости сканирования по ширине образца V_{sc} (D) для асферической поверхно-

сти гиперболической $y = -(0.4 - \sqrt{0.16 + 4.4x^2}/2.2)$ с

формой сжатия 1, 2, 3 функции у: экспериментальные измерения (х) и рассчетная форма поверхности линз (–).

формы Фотография асферических цилиндрических различной линз после обработки лазерно-плазменным методом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ (1)



Сравниваемые параметры	Сферические линзы	Гиперболические линзы
Энергия в цен- тре максимума по сравнению с полной энерги- ей. %	46	67
Ширина фокус- ной линии, в ко- торой содер- жится 66% пол- ной энергии, мкм	10	5



б)

Измеренное распределение интенсивности (а) для безаберрационной асферической линзы (-) и для квазисферической линзы (--) (сканирование вдоль длины цилиндрического элемента) и фотография распределния в фокусе этой асферической линзы (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ (2) ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЛИНЗЫ



Главная спецификация			
Материал	Schott SFL 57		
Поверхность	Асферическая		
Расчетная длина волны	800 нм		
Точность поверхности	λ/4		
Качество поверхности	MIL 40–20		
Показатель преломления	1.82 ± 0.001		
Ширина	1.5 мм		
Толщина	1.5 мм		
Числовая апертура	0.85		
Рабочее расстояние BFL	90 мкм		
Остаточная расходимость	< 8 мрад FW 1/е ²		
Длина = 10 мм	9007.100		
Длина = 11 мм	9007.200		
Длина = 12 мм	9007.300		
Длина = 12 мм	9007.350		
с областями монтажа			







Рис.2. Распределение интенсивности в фокусе асферической линзы на расстоянии 290 мм после нее.

- 122 -

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ (3) ВОЛОКОННЫЙ СОЕДИНИТЕЛЬ (ВИД В)



Эффективность	20-	Рволокон. выход	Р волокон. выход
соединения	00 -	Рволокон. вход	Р _{лазер} · Р _{волокон. соед.}

а) лазер: 1 мкм х 100 мкм, $\theta_{_{\perp FW1/e^2}} = 80^{\circ}$, $\theta_{_{\parallel FW1/e^2}} = 12^{\circ}$, $P_{_{nasep}} = 1$ Вт

б) волокно: ø (сердцевина/оболочка) = 50 мкм / 125 мкм, числовая апертура NA = 0.3, покрытие T_{волонио} > 0.99



Эффективность соединнеия, размеры фокального пятна

6. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ (ДЕТАЛИ)



Характерные кривые роста температуры пористого стекла во времени под действием лазерного излучения 1) ($T^* \sim 5000$ K) и при традиционном нагреве в печи; 2) ($T^* = 25000$ K).

Изменение во времени пористости *m* и толщины денсификации (b) под действием лазерного излучения (1) и во время нагрева в печи (2) от времени воздействия.

ПОЧЕМУ ВРЕМЯ ЛАЗЕРНОЙ ДЕНСИФИКАЦИИ МНОГО МЕНЬШЕ, ЧЕМ ВРЕМЯ ДЕНСИФИКАЦИИ В ПЕЧИ?

- 125 -

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЯЗКОСТЬ СТЕКЛООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

He-Ne



Схема эксперимента по выявлению влияния лазерного облучения на вязкость стекол

$$\eta = A\rho g t_0 \frac{I^4}{y h^3}$$

$$\frac{\eta}{\eta_{v}} = 1 + \frac{CP}{N_{0}\Delta\varepsilon} \left(\exp\left(\frac{T^{*}}{T}\right) - 1 \right)$$

при Т* >> Т

$$\frac{\eta_{v}}{\eta P} = \frac{C}{B_{0}\Delta\varepsilon} = L = \text{const}$$

где

η — термическая вязкость

- η_ν нетермическая вязкость
- Р мощность поглощенного света

С — постоянная, зависящая от времени установления равновесного состояния

 $\Delta \epsilon$ — превышение энергии молекул над равновесной энергией

NN экспе- рим.	i _n	<i>i_{n+1}</i>	<i>i_{n+2}</i>
<i>h</i> , мм	1.36	1.45	1.06
	1.45	1.38	1.04
<i>d</i> , мм	3.1	4.3	2.1
	3.3	5.0	2.6
У	0.16	0.24	0.66
	0.025	0.11	0.12
<i>Р</i> , мВт	1	2	1.4
	_	_	_
L	0.62 · 10 ⁻¹⁰	0.52 · 10 ⁻¹⁰	0.66 ·10 ⁻¹⁻
	_	_	

– 126 – ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



кобальта

Схема эксперимента (вид сверху на тигель) 1) процесс стеклообразования под действием лазерного излучения на образце модельного В₂O₃–Na₂O стекла с примесью Со–порошка и 2) приготовление среза и фотографирование образца



Теневые фотографии потоков конвекции в $Na_2O-B_2O_3$ (5% SiO₂) стекле во время процесса плавления. Образец 3: $T_{st} = 800^{0}C$, без лазера; время отжига 2 час. Образец 5: $T_{st} = 800^{0}C$ He–Ne лазер; время отжига 1 час. Образец 6: T_{st} = $800^{0}C$, He–Ne лазер; время отжига 2 час.

7. ПЕРСПЕКТИВЫ ЛТ-МОК

– 128 – ПЕРСПЕКТИВЫ ЛТ–МОК

<u>1. СОЗДАНИЕ НОВЫХ МИКРООПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОПТИЧЕСКИХ</u> <u>МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДЫ:</u>

- ИМПРЕГНИРОВАНИЕ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ (Cs, Pb), КЕРАМИКИ И СОЕДИНЕНИЙ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ДЕНСИФИКАЦИЕЙ, СПЕКАНИЕМ И Т.Д;
 - АМОРФИЗАЦИЯ НЕТРАДИЦИОННОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ И КЕРАМИКИ;
 - ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ СТЕКЛООБРАЗУЮЩИХ ПОРОШКОВ;
 - ЛАЗЕРНОЕ ОБЛУЧЕНИЕ СТЕКЛООБРАЗНЫХ КОМПОЗИЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ВАРКИ СТЕКЛА
 - ИОНООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ;
 - ДИФФУЗИЯ В СТЕКЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ.

<u>2. СОЗДАНИЕ НОВЫХ ТИПОВ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (ВКЛЮЧАЯ АСТИГМАТИЧЕСКИЕ, АХРОМАТИЧЕСКИЕ И Т.Д.), СОЗДАНИЕ НОВЫХ</u> СОГЛАСУЮЩИХ, ИЗОБРАЖАЮЩИХ И РАСТРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СУЩЕСТВУЮЩИХ:

- СОЗДАНИЕ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ С ВЫСОКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ (ТЕХНОЛОГИЯ ДЕНСИФИКАЦИИ);
- ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ОКОН И ИЗОБРАЖАЮЩИХ КОМПОНЕНТ (ТЕХНОЛОГИЯ ДЕНСИФИКАЦИИ);
- ПРОИЗВОДСТВО СОГЛАСУЮЩИХ ОПТОВОЛОКОННЫХ УСТРОЙСТВ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ ТРУБОК (ТЕХНОЛОГИЯ АМОРФИЗАЦИИ);
- АСФЕРИЗАЦИЯ МИКРО– И МАКРОЛИНЗ (СВЕРХЗАКАЛКА И ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ);

- УЛУЧШЕНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ (СВЕРХЗАКАЛКА);
- УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ВОЛНОВОДОВ ЛАЗЕРНЫМ ОТЖИГОМ (ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ);
- СОЗДАНИЕ НОВЫХ ТИПОВ МИКРОРАСТРОВ ПУТЕМ АБЛЯЦИИ ПОЛИМЕРОВ;
- СОЗДАНИЕ НОВЫХ СОВЕРШЕННЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ТЕРАПИИ, ДИАГНОСТИКИ И ХИРУРГИИ;
- СОЗДАНИЕ НОВЫХ ВИДОВ ОПТИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН, ПЛАНАРНЫХ И КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ;
- СОЗДАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ.

3. ВОЗМОЖНОСТЬ ОБЪЕДИНЕНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ОДНОМ ПРОЦЕССЕ

4. ВОЗМОЖНОСТЬ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОМПЬЮТЕРНОГО КОНТРОЛЯ ЗА СОЗДАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТ И АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ





В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые при нашей жизни лазеры уже сегодня широко проникли в промышленность, связь, медицину, биологию, экологию, строительство, транспорт, шоу-бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, лазерные CD-диски, лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей и т.д., а в ближайшей перспективе для избавления человечества от очков и морщин (да, да — сотни операций по лазерной полировке роговицы глаза и кожи уже проведены), разработка реакций лазерного управляемого термоядерного синтеза и лазерных реактивных двигателей, создание трехмерных объектов за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом и многое, многое другое.

История кафедры ЛТ и ЭП делится на 3 разных периода:

Период I — с момента появления лаборатории лазерной технологии в ЛИТМО в 1965 г. до момента организации кафедры охраны труда и окружающей среды (ОТ и ОС) с отраслевой лабораторией лазерных технологий (ОЛЛТ) в 1982 г.

Период II — период развития кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ — 1982-1988 гг. **Период III** — с момента создания на базе кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ кафедры лазерных технологий — 1988 г., в дальнейшем преобразованной в кафедру лазерных технологий и экологического приборостроения и по настоящее время.

Охарактеризуем периоды 1, 2 и 3 фактами.

1976 г. — научные работы ОЛЛТ по физическим основам лазерной обработки тонких пленок удостоены Премии Президиума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники».

1983, 1984 гг. — работы кафедры удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу.

1986 г. — работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Государственной Премии СССР.

1988 г. — кафедра ОТОС с лабораторией ЛТ по инициативе ректора ЛИТМО преобразована в выпускающую кафедру «Лазерных технологий» и начинается систематический выпуск специалистов по специальности 07.23 «лазерная техника и лазерные технологии».

1996 г. — кафедра ЛТ переименована в кафедру ЛТ и ЭП и осуществляет выпуск специалистов как лазерным технологиям, так и по специальности «инженер-педагог» со специализацией «экология».

С 2000 г. — лаборатория и кафедра ЛТ признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микротехнологий».

2001 – 2007 г. — этот статус ежегодно подтверждается.

- За период времени с 1988 по 2005 г. кафедра выпустила более 300 специалистов в области лазерных технологий;
- За тот же период времени сотрудниками и аспирантами кафедры защищены 2 докторские и более 20 кандидатских диссертаций;
- По результатам работ кафедры издано 9 монографий;
- Результаты исследований сотрудников кафедры изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах;
- В настоящее время кафедра активно сотрудничает с университетами и институтами Германии (BIAS, FHS Emden), Китая (HUST), Франции (ENISE), Италии (Lecce University) и др.

В последние годы по приглашению различных зарубежных организаций прочтен ряд курсов лекций по лазерным технологиям.

Основные научные направления кафедры

- 1). Лазерная обработка пленочных элементов.
- 2). Лазерное локальное осаждение тонких пленок.

3). Лазерные технологии прецизионной размерной обработки.

4). Создание новых оптических материалов и элементов микро- и нанооптики на базе лазерных технологий.

5). Лазерные технологии элементов фотоники и волоконно- оптических устройств.

6). Создание теории субдлинноволновых источников излучения и разработки методов изготовления и контроля ближнепольных зондов.

7). Лазерное медицинское оборудование и инструмент.

8). Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом: лазерная абляция и конденсация металлических и композиционных пленок и эффекты самоорганизации.

9). Лазерный трехмерный синтез объемных моделей.

10). Физико-математическое моделирование в задачах дистанционного лазерного зондирования морской среды.

Заведует кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения Заслуженный деятель науки России, Лауреат Государственной Премии СССР, действительный член Академии Инженерных Наук РФ, д.т.н., профессор В.П.Вейко. Среди преподавателей кафедры Почетный работник высшей школы, д.т.н., профессор Е.Б.Яковлев, д.т.н., профессор Е.А.Шахно, Почетный работник высшей школы, к.ф.–м.н., доцент Г.Д.Шандыбина, к.т.н., доцент В.В.Барановский, к.ф.–м.н., доц. Ю.И.Копилевич, к.ф.–м.н., доцент А.Н.Проценко. Вадим Павлович Вейко

Опорный конспект лекций по курсу «Физико–технические основы лазерных технологий». Раздел «Новые лазерные технологии»

Компьютерный набор и верстка Дизайн обложки Редакционно–издательский отдел СПб ГИТМО (ТУ) Зав. отделом Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99. Подписано в печать Отпечатано на ризографе Тираж 200 экз.