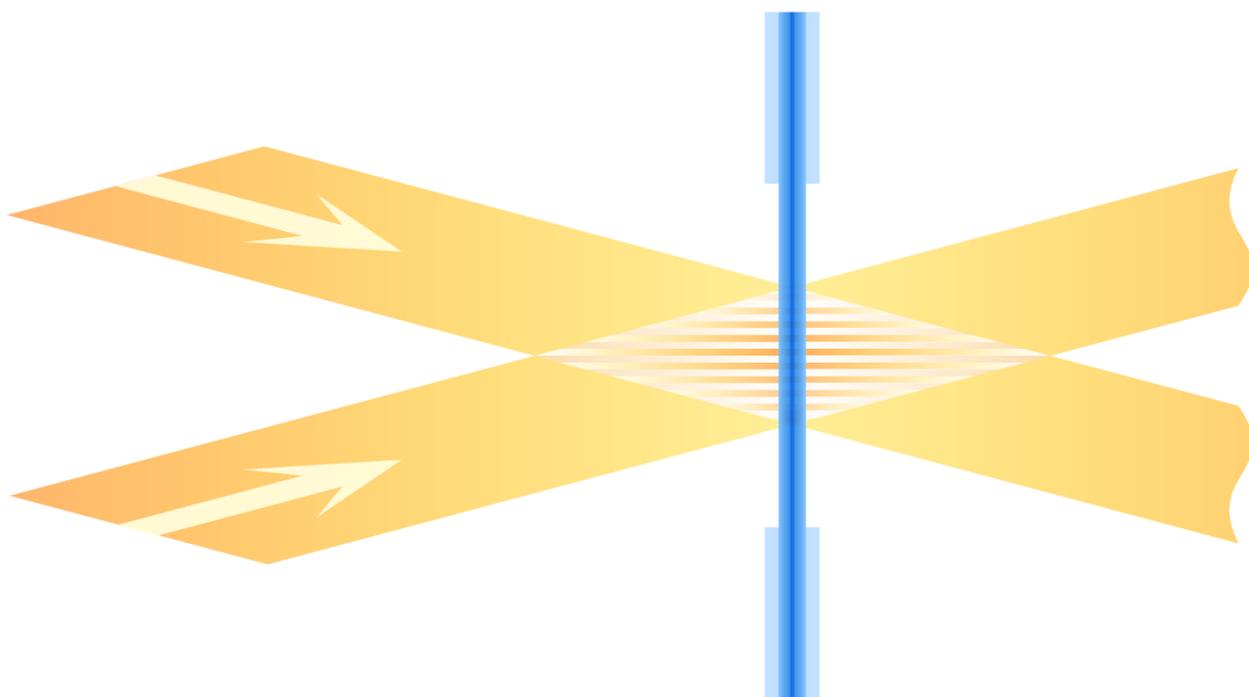


А.И. Грибаев, С.В. Варжель, А.В. Куликов
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗАПИСИ
ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.И. Грибаев, С.В. Варжель, А.В. Куликов

**ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗАПИСИ
ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА**

Учебное пособие

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы
связи» в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2018

А.И. Грибаев, С.В. Варжель, А.В. Куликов, Интерферометрические методы записи волоконных решеток Брэгга. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 43 с.

Рецензенты:

Шамрай Александр Валерьевич, доктор физико-математических наук, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, заведующий лабораторией квантовой электроники.

Рупасов Андрей Викторович, кандидат технических наук, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», начальник группы исследования и разработки ВОГ.

В рамках учебного пособия рассмотрены лазерные источники излучения, применяемые для формирования интерференционной картины. Представлены основные интерферометрические оптические схемы для записи волоконных брэгговских решёток. Также раскрыты возможности и практические аспекты схемы записи решёток Брэгга на основе интерферометра Тальбота с использованием KrF эксимерной лазерной системы типа задающий генератор – усилитель.

Учебное пособие рекомендовано для магистров, обучающихся по направлению 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (образовательная программа «Нанотехнологии в волоконной оптике»).

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета лазерной и световой инженерии «13» июня 2017 года, протокол № 6.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2018

© А.И. Грибаев, С.В. Варжель, А.В. Куликов, 2018

Оглавление

Предисловие	4
Глава 1. Источники оптического излучения, применяемые для интерферометрической записи волоконных решеток Брэгга	5
1.1. Лазерные источники излучения для записи волоконных брэгговских решеток	6
1.2. Эксимерные лазерные системы	7
Список использованной литературы (Глава 1)	14
Глава 2. Оптические схемы записи решёток Брэгга интерферометрическим методом	17
2.1. Основные интерферометрические оптические схемы для записи решёток Брэгга	17
2.2. Интерферометры для записи решёток Брэгга в процессе вытяжки оптического волокна	21
2.3. Интерферометр Тальбота	23
Список использованной литературы (Глава 2)	27
Глава 3. Лабораторная установка по записи волоконных решёток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота и KrF эксимерной лазерной системы	29
3.1. Описание лабораторной установки	29
3.2. Возможности по записи решёток Брэгга на лабораторной установке	35
Список использованной литературы (Глава 3)	39
Список сокращений	40

Предисловие

Активное развитие технологий записи волоконных брэгговских решёток началось в конце прошлого столетия. На сегодняшний день такие структуры находят широкое применение при разработке пассивных волоконно-оптических компонентов (устройство ввода/вывода заданного спектрального канала в волоконно-оптической линии связи; компенсатор дисперсии; поляризатор), сенсорных систем, волоконных лазеров и полупроводниковых лазерных диодов с внешним резонатором. В свою очередь идёт активное внедрение вышеперечисленных приборов в высокотехнологические сферы деятельности человека.

Сейчас существует множество способов формирования решеток Брэгга в оптическом волокне, одним из которых является интерферометрический метод, в котором запись брэгговской решетки осуществляется путем помещения оптического волокна в область интерференционной картины, перпендикулярно полосам её минимумов и максимумов. Преимущество данного метода заключается в широком диапазоне перестройки периода интерференционной картины и возможности его использования для записи решеток Брэгга в процессе вытяжки оптического волокна.

В настоящем учебном пособии представлены интерферометрические методы записи волоконных брэгговских решеток. В первой главе рассмотрены применяемые лазерные источники и характеристики их лазерного излучения. Вторая глава посвящена различным конфигурациям интерферометров, с помощью которых создаётся интерференционная картина для облучения оптического волокна. В третьей главе представлено подробное описание и возможности лабораторного стенда по записи волоконных брэгговских решеток с использованием интерферометра Тальбота и KrF эксимерной лазерной системы.

Глава 1. Источники оптического излучения, применяемые для интерферометрической записи волоконных решеток Брэгга

Одной из важнейших характеристик источника оптического излучения является ширина спектральной линии, которая определяет его когерентность. Когерентность – это согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов. Если разность фаз двух колебаний остаётся постоянной во времени и при их сложении имеет место интерференция, то такие колебания называются когерентными. Два идеально монохроматических колебания одной частоты всегда когерентны и интерферируют. В противоположность этому колебания, разность фаз которых меняется беспорядочно и достаточно быстро, называются некогерентными. Для них интерференция не имеет места [1]. Степень согласованности процессов может быть различной – пространственной и временной. Благодаря наличию частотно-селективного резонатора лазеры характеризуются высококогерентным оптическим излучением. Для количественного описания когерентности одночастотных лазерных источников оптического излучения используется параметр – длина временной когерентности:

$$l_{\text{ког}} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}, \quad (1.1)$$

где λ_0 – длина волны излучения лазера, $\Delta\lambda$ – ширина спектральной линии.

Когерентные свойства лазеров позволяют формировать интерференционную картину с видностью ν близкой к 1. Видность интерференционной картины можно рассчитать по следующей формуле:

$$\nu = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (1.2)$$

где I_{max} , I_{min} – интенсивности в максимуме и минимуме интерференционной картины.

Интерференционная картина, представляющая собой чередование темных и светлых полос, может быть использована для записи волоконных брэгговских решеток (ВБР).

Кроме когерентных свойств, при выборе источника оптического излучения для записи ВБР необходимо учитывать генерируемую им длину волны, и номинальную энергию. Длина волны оптического излучения должна соответствовать спектральной области поглощения в материале, а плотность энергии не превышать порога его разрушения. На рисунке 1.1 представлен спектр поглощения германо-силикатного стекла, основного материала для производства оптических волокон (ОВ) [2].

Как видно из представленного спектра, поглощение германо-силикатных стекол имеет три максимума в УФ диапазоне, расположенных вблизи 185, 242, 325 нм. Поглощение света может приводить к изменению показателя преломления германо-силикатного стекла, такое явление называют фоторефрактивностью. Однако в научной литературе для описания происходящих при облучении стекла процессов часто употребляют более широкое понятие – «фоточувствительность», имея в виду то, что при

облучении стекла изменяется не только его показатель преломления, но и ряд других материальных свойств.

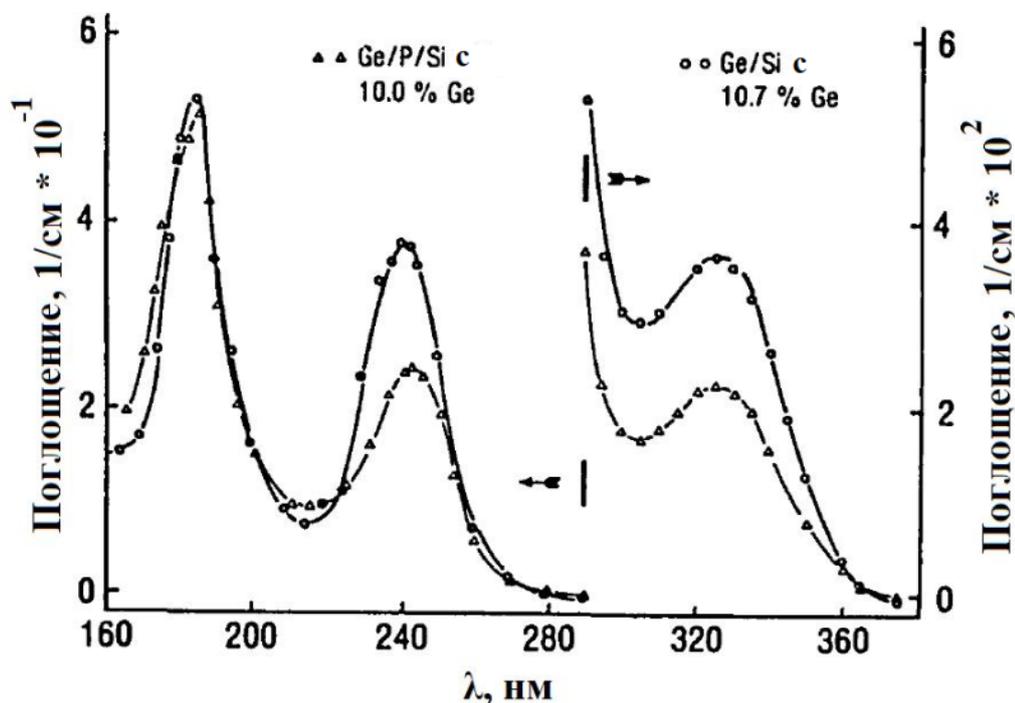


Рис. 1.1. Спектр поглощения германо-силикатного стекла в УФ диапазоне

Более подробно о модели фоточувствительности германо-силикатного стекла смотрите [3].

1.1. Лазерные источники излучения для записи волоконных брэгговских решеток

Впервые интерферометрический метод формирования ВБР описан в работе [4]. В настоящей работе использовался импульсный перестраиваемый лазер на кумариновых красителях с длиной волны излучения в диапазоне 486-500 нм. В общем случае среда генерации этого лазера представляет собой кювету флуоресцирующего раствора красителя. Этот краситель оптически накачивался ХеСl эксимерным лазером, работающим на фиксированной длине волны 308 нм. Также применялся нелинейный оптический кристалл β-бората бария (ВВО) для частотного удвоения и получения длины волны выходного излучения в диапазоне 230-255 нм, совпадающем с полосой поглощения германо-силикатного стекла. Лазер генерировал импульсы мощностью до 40 мВт и длиной временной когерентности около 10 см.

В работе [5] для реализации интерферометрической схемы записи ВБР использовался лазер на красителе с накачкой Nd:YAG-лазером, выходное излучение которого имело удвоенную частоту для получения УФ излучения в диапазоне 240-250 нм. Мощность излучения достигала 75 мВт с частотой следования импульсов 25 Гц и длиной временной когерентности 7 см.

Для записи ВБР с помощью эллиптического интерферометра Тальбота [6] применяли пятую гармонику Nd: YAG лазера (алюмо-иттриевый гранат с легированием неодимом), который генерировал импульсы с длиной волны 213 нм, длительностью 150 пс при длине временной когерентности около 2 см. Диаметр лазерного пучка равнялся 5,5 мм. Энергия пучка составляла 7 мДж.

Авторы работы [7] в качестве источника излучения использовали коммерческий лазер с диодной накачкой Spectra Physics UK Ltd. Nd³⁺:YLF, который генерирует импульсы длительностью около 5 нс с частотой 3 кГц и длиной волны излучения 523 нм. Лазерные активные YLF элементы изготавливаются из кристалла иттрий-литиевого фторида (YLiF₄), легированного ионами неодима. За счет удвоения частоты оптического излучения, запись ВБР производилась импульсами на длине волны 262 нм. Энергия в импульсе составляла 120 мДж.

Также в работе [8] для записи ВБР использовали газовый аргоновый лазер (Ar⁺). Данный лазер генерировал излучение в непрерывном режиме на длине волны 514,5 нм с узкой шириной спектра, следовательно, с достаточной длиной когерентности (спектральная ширина линии 3,5 ГГц или 28 пм). При записи ВБР использовали вторую гармонику для получения длины волны 257,3 нм с выходной мощностью 100 мВт. А в работе [9] запись ВБР производилась излучением удвоенной частоты Ar⁺ лазера с длиной волны 244 нм.

Впервые в работе [10] была представлена запись ВБР излучением третьей гармоники Ti:Sa фемтосекундной лазерной системы Coherent MIRA 900 в интерферометре Тальбота. Длина волны лазерного излучения равнялась 262 нм. Частота следования лазерных импульсов длительностью 350 фс составляла 1 кГц. Стоит отметить, что для обеспечения совмещения во времени и пространстве оптических пучков такой короткой длительности, юстировка интерферометра должна осуществляться с высокой точностью.

Применение мощного импульсного эксимерного лазера Lambda Physik EMG 150 MSC типа задающий генератор – усилитель в качестве источника излучения для записи ВБР интерферометрическим методом [11] открыло возможности записи высокоэффективных решеток Брэгга в одноимпульсном режиме. Это, в свою очередь, стало использоваться для записи ВБР в процессе вытяжки оптического волокна.

1.2. Эксимерные лазерные системы

Рассмотрим класс эксимерных лазеров, в которых атом инертного газа (например, Ar, Kr, Xe) в возбужденном состоянии соединяется с атомом галогена (например, F, Cl), что приводит к образованию эксимера галогенидов инертных газов. В качестве конкретных примеров укажем ArF ($\lambda=193$ нм), KrF ($\lambda=248$ нм), XeCl ($\lambda=308$ нм) и XeF ($\lambda=351$ нм), которые генерируют в УФ диапазоне. В возбужденном состоянии связь имеет ионный характер: в процессе образования связи возбужденный электрон переходит

от атома инертного газа к атому галогена. Поэтому подобное связанное состояние также называют состоянием с переносом заряда. Рассмотрим подробнее KrF-лазер, так как он часто применяется для записи ВБР [12].

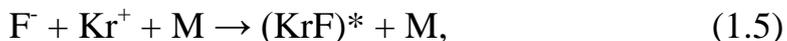
Обращаясь к механизмам возбуждения, заметим, что электрическое возбуждение приводит в основном к образованию возбужденных атомов Kr и ионов Kr. Обе частицы сразу же приводят к образованию возбужденных молекул KrF. В самом деле, возбужденный атом Kr может реагировать с молекулой F₂ в соответствии со следующей реакцией:



Ион Kr⁺, напротив, реагирует с ионами F⁻, которые образуются в реакции присоединения электрона с диссоциацией:



Для одновременного выполнения законов сохранения энергии и импульса рекомбинация двух ионов должна протекать посредством трехчастичного столкновения:



где M – атом буферного газа (обычно это He или Ne). Из-за большого расстояния взаимодействия двух ионов данная реакция также идет с очень большой скоростью, если давление буферного газа достаточно велико [12].

Эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов обычно накачиваются электрическим разрядом. Предыонизация обычно достигается излучающими в УФ-диапазоне искровыми разрядами.

Поскольку время жизни верхнего уровня сравнительно невелико, а также чтобы избежать образования дуги, необходимо обеспечить быструю накачку (длительность импульса накачки 10-20 нс) [12].

Большинство коммерчески доступных эксимерных лазеров хорошо изучены и широко применяются в медицине, фотолитографии и научных исследованиях. Они также могут быть использованы для записи ВБР методом фазовой маски [13,14].

В то же время известно, что традиционные эксимерные лазеры имеют сравнительно низкое качество пучка. Очевидно, что улучшение характеристик излучения и возможность управления параметрами лазеров данного типа расширяет диапазон их применения. Необходимые характеристики могут быть получены при использовании специальных селективных и/или неустойчивых резонаторов. В зависимости от требований к ширине спектра генерации, расходимости и энергии импульса используются либо лазеры на основе одного разрядного модуля, либо системы генератор – усилитель с двумя разрядными модулями. В системе генератор – усилитель излучение маломощного задающего генератора, в котором сформированы пространственные и спектральные характеристики, инжектируется и усиливается в регенеративном усилителе. Системы задающий генератор – усилитель являются технически более сложными, но позволяют чрезвычайно гибко и в широких пределах изменять и формировать пространственные и спектральные характеристики излучения

при высоких энергиях импульса генерации. В рамках этого подхода был реализован ряд схем [15-20] для сужения спектра [21].

Для записи волоконных решёток Брэгга в одноимпульсном режиме интерферометрическим методом к характеристикам лазерного излучения предъявляются следующие требования:

- импульсный режим генерации;
- высокая энергия в импульсе, не менее 100 мДж;
- ширина спектральной линии излучения, менее 10 пм;
- пространственная когерентность, более 800 мкм;
- отклонение энергии в распределении пучка, менее 20%.

Всем выше представленным требованиям соответствуют KrF [22-24] и ArF [25,26] эксимерные лазеры типа генератор – усилитель с дисперсионным резонатором. Такие эксимерные лазерные системы имеют оптимальные характеристики генерируемого пучка. С помощью дисперсионного резонатора задающего генератора достигается достаточная временная и пространственная когерентность, а с прохождением через телескопический резонатор усилителя лазерный пучок длительностью порядка 20 нс достигает требуемой энергии более 100 мДж.

Ниже подробно рассмотрим две эксимерные лазерные системы подобного класса – Coherent COMPexPro 150T и OptoSystems CL-7550.

Coherent COMPexPro 150T

Одна из наиболее успешных лабораторий, занимающихся записью ВБР интерферометрическим методом, находится в Институте Фотонных Технологий, г. Йена, Германия (The Leibniz Institute of Photonic Technology) [27-30]. Схема записи на основе интерферометра Тальбота установлена на башне вытяжки ОВ. Система зеркал транспортирует излучение к интерферометру, установленному в той части башни, где ОВ охлаждается до комнатной температуры, а защитное покрытие еще не нанесено. Индуцирование ВБР производится одним импульсом эксимерного лазера. ОВ со сформированными в нём решётками поступает в фильеру с защитным покрытием и после его отверждения приобретает прочностные свойства близкие к волоконному световоду без брэгговских решеток. Перед намоткой ОВ специализированным принтером наносятся цветные метки на области с решетками для визуализации локализации ВБР. Таким образом, в институте создан замкнутый процесс массового производства ОВ с решетками Брэгга.

Как уже ранее отмечалось, схема записи ВБР на основе интерферометра чувствительна к временной и пространственной когерентности лазерного источника излучения, поэтому в схеме записи на башне вытяжки используется лазерная система типа задающий генератор – усилитель Coherent COMPexPro 150T. Характеристики лазера представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Технические характеристики лазерной системы Coherent COMPexPro 150T

Длина волны	248 нм
Спектральная ширина излучения	< 3 пм
Номинальная стабилизированная энергия в импульсе	450 мДж
Максимальная частота повторения импульсов	50 Гц
Длительность импульса ¹	~25 нс
Стабильность энергии в импульсе	$\sigma < 2\%$
Размер пучка ¹	24 мм × 10 мм
Угловая расходимость ¹	< 0,2 мрад
Пространственная когерентность	> 1 мм

¹ – на уровне 1/2 от максимума

Ширина спектральной линии генерации заявлена на уровне менее 3 пм, что соответствует длине временной когерентности около 20 мм. Пространственная когерентность превышает 1 мм, что позволяет получать ВБР с требуемыми характеристиками длины волны брэгговского резонанса, коэффициента отражения и шириной спектра на полувысоте, как в режиме одиночного импульса, так и в режиме длительной экспозиции.

OptoSystems CL-7550

Работы по созданию эксимерных лазеров с высокой энергией и когерентностью проводились на промышленных образцах KrF-лазеров серии OptoSystems CL7500, разработанных и созданных в Центре физического приборостроения Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН [21]. Лазерная система состоит из двух одинаковых газоразрядных модулей 1 и 2, оптических блоков 3 и 4, размещенных на едином оптическом столе. На рисунке 1.2 представлена оптическая схема Optosystems CL-7550 [31].

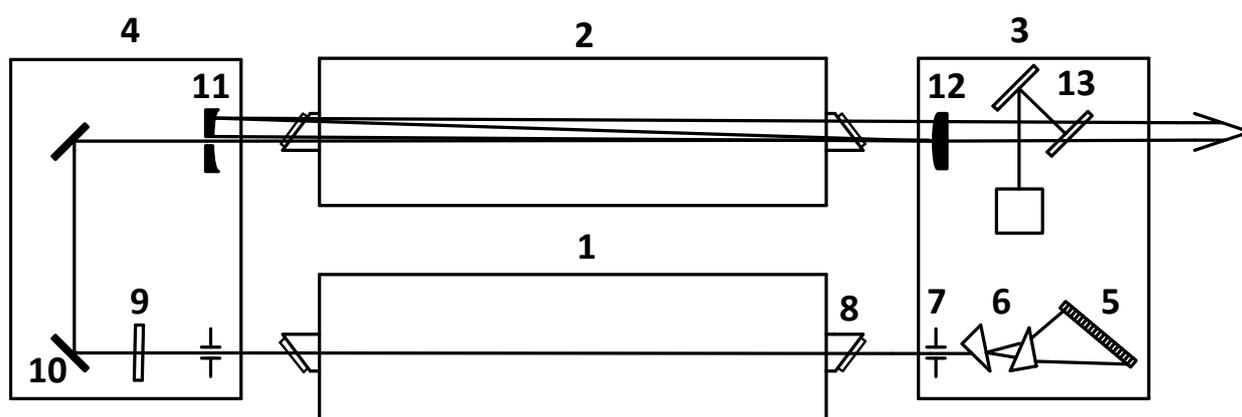


Рис. 1.2. Оптическая схема Optosystems CL-7550

Модуль 1 работает как задающий генератор (ЗГ), а модуль 2 – в режиме усилителя мощности (УМ). Вывод излучения из газоразрядных камер 1 и 2 осуществляется через пластины 8, установленные под углом Брюстера к оптической оси лазерного модуля для минимизации внутрирезонаторных

потерь. Резонатор ЗГ состоит из дифракционной решетки 5, призмного телескопа 6 и выходного зеркала 9 с коэффициентом отражения около 20 %. Использование дифракционной решетки в качестве одного из зеркал позволяет уменьшать ширину линии генерации до 1,5 пм. Для улучшения пространственной селекции излучения применяются диафрагмы 7. Призмный телескоп состоит из 2-х призм, изготовленных из кварца с увеличением 4. Излучение из ЗГ транспортируется в неустойчивый резонатор УМ поворотными зеркалами 10 и проходит через вогнутое сферическое зеркало 11 с отверстием связи. Пучок диаметром 1,5 мм, проходя через межэлектродный промежуток, попадает на выпуклое сферическое зеркало резонатора 12 и, отразившись от него, вновь проходит через активную среду УМ. При этом пучок уже расходится так, что на вогнутом зеркале резонатора он полностью перекрывает поперечное сечение активной среды. Далее пучок отражается от вогнутого зеркала 11 и, усиливаясь в последний раз в активной газовой среде, выходит из лазерной системы через апертуру. Узел измерения выходной энергии излучения 13, осуществляет обратную связь с модулем синхронизации, с помощью ответвления незначительной части энергии лазерного пучка на измеритель энергии. В свою очередь, модуль синхронизации, предназначенный для управления временными задержками ЗГ и УМ, также применяется для синхронизации с другим оборудованием, участвующим в процессе записи ВБР.

На рисунке 1.3 представлено распределение энергии в лазерном пучке после прохождения апертурной диафрагмы $14 \times 6 \text{ мм}^2$.

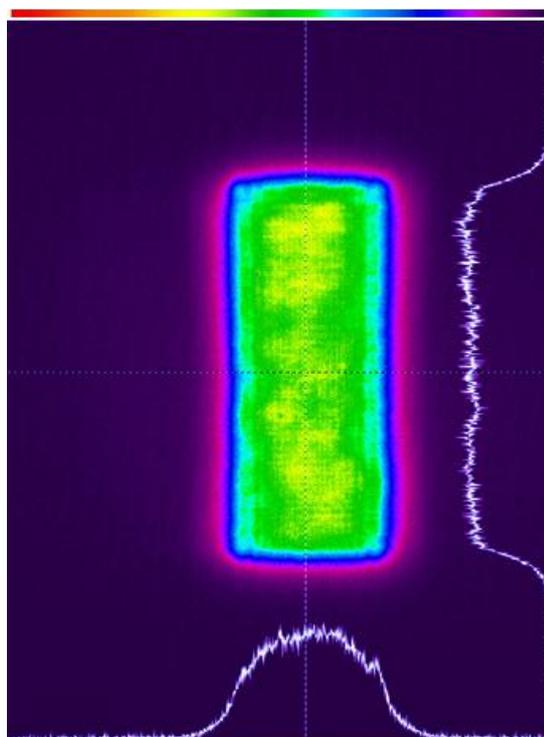


Рис. 1.3. Распределение энергии в пучке

В таблице 1.2 представлены характеристики, заявленные производителем.

Таблица 1.2. Технические характеристики лазерной системы CL-7550

Длина волны	248 нм
Спектральная ширина излучения	< 3 пм
Диапазон перестройки центральной длины волны излучения	30 пм
Номинальная стабилизированная энергия в импульсе	250 мДж
Максимальная частота повторения импульсов	50 Гц
Длительность импульса ¹	~ 20 нс
Стабильность энергии в импульсе	$\sigma < 2\%$
Размер пучка ¹	20 мм × 6 мм
Угловая расходимость ¹	< 0,2 мрад
Пространственная когерентность	> 5 мм
Временная когерентность	> 10 мм
Временная нестабильность импульса генерации	< 2 нс

¹ – на уровне $\frac{1}{2}$ от максимума

Анализатор профиля пучка Ophir Optonics SP 620 позволяет осуществлять измерения диаметров колец интерференционной картины, полученной с помощью интерферометра Фабри-Перо (ИФП), с высокой точностью (рис. 1.4).

Измеренная спектральная ширина линии излучения эксимерной лазерной системы составила 1,68 пм, что соответствует заявленным характеристикам производителя. Отсюда можно оценить длину когерентности ~ 36,7 мм (подробнее см. главу 3 учебного пособия).

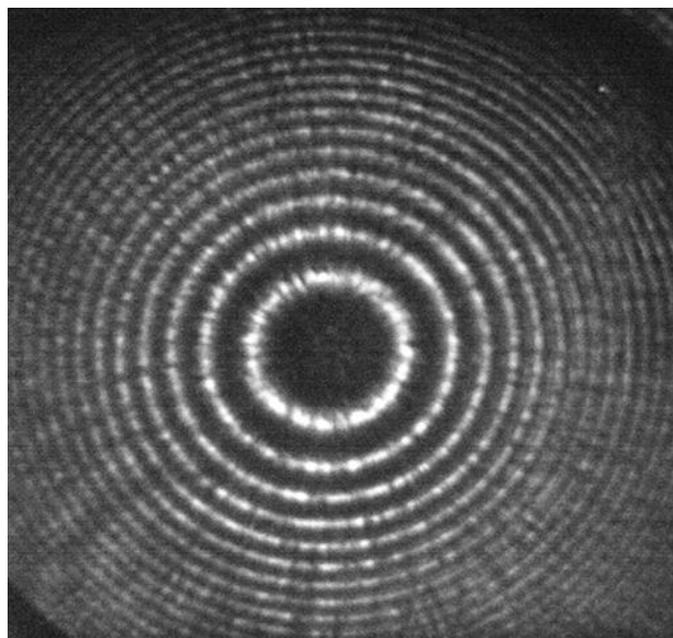


Рис. 1.4. Фотографическое изображение интерференционной картины, полученной с помощью интерферометра Фабри-Перо

В лазерной системе Optosystems CL-7550 заявлена пространственная когерентность > 5 мм на полувысоте. Для проверки соответствия заявленных

характеристик лазерной системы был проведен стандартный опыт Юнга. Интерферометр Юнга представляет собой непрозрачный экран, в котором на некотором расстоянии друг от друга проделаны два малых отверстия. На экран перпендикулярно падает волна, поле которой мы считаем стационарным и однородным. Волновые пучки, исходящие из отверстий, интерферируют на экране, расположенном на некотором расстоянии от экрана с отверстиями. Если разность хода лучей от щелей не превышает длину временной когерентности, контраст интерференционной картины определяется исключительно пространственной когерентностью источника излучения. Для определения видности интерференционной картины используют формулу (1.2).

Длина пространственной когерентности определяется при равной интенсивности пучков, вышедших из отверстий, в точке, равноудаленной от отверстий. Длина пространственной когерентности будет при этом равна максимальному расстоянию между отверстиями, при котором $v \geq 0,5$.

Для исследования пространственной когерентности использовалась латунная пластина с двумя круглыми отверстиями диаметром 200 мкм, расстояние между центрами которых составляло 5 мм. В плоскость экрана была установлена камера, чувствительная к излучению УФ диапазона. Полученное изображение представлено на рисунке 1.5.

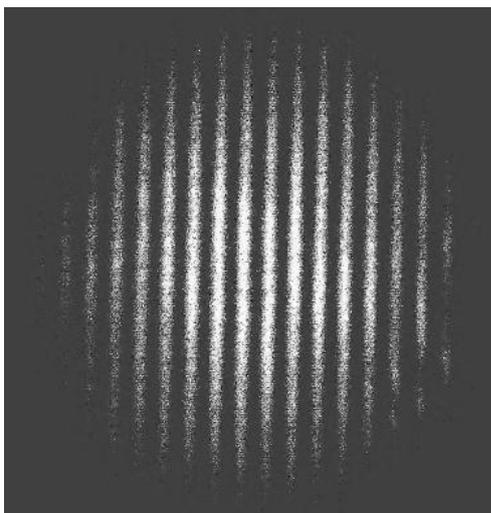


Рис. 1.5. Картина интерференции, полученная в опыте Юнга

Видность полученной интерференционной картины близка к 1, что позволяет сделать вывод о том, что пространственная когерентность лазерной системы более 5 мм и сопоставима с шириной пучка (6 мм).

Таким образом, лазерная система Optosystems CL-7550 соответствует всем предъявленным требованиям к источнику излучения для записи ВБР интерферометрическим методом, как в одноимпульсном режиме, так и в многоимпульсном.

Список использованной литературы (Глава 1)

1. **Крылов, К.И.** Основы лазерной техники / К. И. Крылов, В. Т. Прокопенко, В. А. Тарлыков // Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. – 316 с.
2. **Yuen, M. J.** Ultraviolet absorption studies of germanium silicate glasses / M. J. Yuen // *Appl. Opt.* – 1982. – V. 21. – № 1. – P. 136-140.
3. **Варжель, С. В.** Волоконные брэгговские решетки / С. В. Варжель // СПб: Университет ИТМО, 2015. – 65 с.
4. **Morey, W. W.** Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method / W. W. Morey, W. H. Glenn // *Optics Letters.* – 1989. – V. 14. – № 15. – P. 823-825.
5. **Dockney, M. L.** Fibre Bragg gratings fabricated using a wavelength tuneable laser source and a phase mask based interferometer / M. L. Dockney, S. W. James, R. P. Tatam, // *Meas. Sci. Technol.* – 1996. – V. 7. – P. 445-448.
6. **Pissadakis, S.** An elliptical Talbot interferometer for fiber Bragg grating fabrication / S. Pissadakis, L. Reekie // *Rev. Sci. Instrum.* – 2005. – V. 76. – № 066101. – P. 1-3.
7. **Armitage, J. R.** Fibre Bragg reflection written at 262 nm using a frequency Nd³⁺-YLF laser / J. R. Armitage // *Electron. Lett.* – 1993. – V. 29. – P. 1181-1183.
8. **Kashyap, R.** All-fibre narrowband reflection gratings at 1500 nm / R. Kashyap, J. R. Armitage, R. Wyatt, S. T. Davey, D. L. Williams // *Electronics letters.* – 1990. – V. 26. – № 11. – P. 730-732.
9. **Wang, Y.** Modified Talbot Interferometer for Fabrication of Fiber-Optic Grating Filter Over a Wide Range of Bragg Wavelength and Bandwidth Using a Single Phase Mask / Y. Wang, J. Grant, A. Sharma, G. Myers // *Journal Of Lightwave Technology.* – 2001. – V. 19. – № 10. – P. 1569-1573.
10. **Becker, M** Fiber Bragg grating inscription combining DUV sub-picosecond laser pulses and two-beam interferometry / M Becker, J. Bergmann, S. Brückner, M. Franke, E. Lindner, M. W. Rothhardt, H. Bartelt // *Optics Express* – 2008. – V. 16. – № 23. – P. 19169-19178.
11. **Askins, C. G.** Fibre Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse / C. G. Askins, T.-E. Tsaim, G. M. Williams, M. A. Puttnam, Y. M. Bashkansky, E. J. Friebele // *Optics Letters.* – 1992. – V. 17. – № 11. – P. 833-835.
12. **Звелто О.** Принципы лазеров / О. Звелто // М.: Мир, 1990. – 558 с.
13. **Hill, K. O.** Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask / K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D.C. Johnson, J. Albert // *Appl. Phys. Lett.* – 1993. – V. 62. – № 10. – P. 1035-1037.
14. **Varzhel', S. V.** Recording Bragg gratings in a birefringent optical fiber with a single 20-ns pulse of an excimer laser / S. V. Varzhel', A. V. Kulikov, I. K. Meshkovskii, V. E. Strigalev // *Journal of Optical Technology.* – 2012. – V. 79. – № 4. – P. 257-259.

15. **Goldhar, J** An injection-locked unstable resonator rare-gas halide discharge laser of narrow linewidth and high spatial quality / J Goldhar, W. R Papoport, J.R. Murray // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1980. – V. 16. – № 2. – P. 235-241.
16. **Pacala, T. J.** Ultranarrow linewidth, magnetically switched, long pulse, xenon chloride laser / T. J. Pacala, I. S. McDermid, J. B. Laudenslager // *Appl. Phys. Lett.* – 1984. – V. 44. – № 7. – P. 658-660.
17. **Bigio, I. J.** Injection-Locking Unstable Resonator Excimer Lasers / I. J. Bigio, M. Slatkine // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1983. – V. 19. – № 9. – P. 1426-1436.
18. **Джиджоев, М. С.** Регенеративное усиление узкополосного излучения в эксимерном лазере на ХеСl / М. С. Джиджоев, С. В. Долгий, И. А. Кудинов, В. Т. Платоненко, Е. В. Слободчиков, М. К. Шаяхметова // *Квантовая электроника*. – 1990. – Т. 17. – № 6. – С. 697-703.
19. **Алимпиев, С. С.** Сужение спектра и ОВФ излучения эксимерного КrF-лазера / С. С. Алимпиев, В. С. Букреев, С. К. Вартапетов, И. А. Веселовский, В. И. Кусакин, С. В. Лиханский, А. З. Обидин // *Квантовая электроника*. – 1991. – Т. 18. – № 1. – С. 89-90.
20. **Бычков, Ю. И.** Режим инжекционной синхронизации в мощном Хе-Сl-лазере / Ю. И. Бычков, Н. Г. Иванов, С. Е. Коваленко, В. Ф. Лосев, Ю. Н. Панченко // *Квантовая электроника*. – 1992. – Т. 19. – № 2. – С. 133-135.
21. **Атежев, В. В.** Эксимерный лазер с высокой когерентностью / В. В. Атежев, С. К. Вартапетов, А. Н. Жуков, М. А. Курзанов, А. З. Обидин // *Квантовая электроника*. – 2003. – Т. 33. – № 8. – С. 689-694.
22. **Dong, L.** Single pulse Bragg gratings written during fibre drawing / L. Dong, J.-L. Archambault, L. Reekie, P. St. J. Russell, D. N. Payne // *Electronics Letters*. – 1993. – V. 29. – № 17. – P. 1577-1578.
23. **Askins, C. G.** Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower / C. G. Askins, M. A. Puttnam, G. M. Williams, and E. J. Friebele // *Optics Letters*. – 1994. – V. 19. – № 2. – P.147-149.
24. **Chojetzki, C.** High-reflectivity draw-tower fiber Bragg gratings - arrays and single gratings of type II / C. Chojetzki, M. M. Rothhardt, J. Ommer, S. Unger, K. Schuster, H.-R. Mueller // *Optical Engineering*. – 2005. – V. 44. – № 6 (060503). – P. 1-2.
25. **Dyer, P.E.** Analysis and application of a 0/1 order Talbot interferometer for 193 nm laser grating formation / P.E. Dyer, R.J. Farley, R. Giedl // *Opt. Commun.* – 1996. – V. 129 – P. 98-108.
26. **Li, C.** Changing photo-written Bragg wavelengths of fiber grating via one phase mask and four mirrors/ C Li, Y. Lu, S. Wu, Q. Su, C. Huang // *Optics & Technology* – 2004. – V. 36 – P. 459-461.
27. **Tenderenda, T.** Fiber Bragg grating inscription in few-mode highly birefringent microstructured fiber / T. Tenderenda, M. Murawski, M. Szymanski, L. Szostkiewicz, M. Becker, M. Rothhardt, H. Bartelt, P. Mergo, K. Skorupski, P.

- Marc, L. R. Jaroszewicz, T. Nasilowski // *Opt. Lett.* – 2013. – V. 38. – P. 2224-2226.
28. **Becker, M.** Chirped Phase Mask Interferometer for Fiber Bragg Grating Array Inscription / M. Becker, T. Elsmann, I. Latka, M. Rothhardt, H. Bartelt, // *J. Lightwave Technol.* – 2015. – V. 33. – P. 2093-2098.
29. **Lindner, E.** Post-hydrogen-loaded draw tower fiber Bragg gratings and their thermal regeneration / E. Lindner, J. Canning, C. Chojetzki, S. Brückner, M. Becker, M. Rothhardt, H. Bartelt, // *Appl. Opt.* – 2011. – V. 50. – P. 2519-2522.
30. **Wang, Y.** Fiber Bragg grating inscription in pure-silica and Ge-doped photonic crystal fibers / Y. Wang, H. Bartelt, M. Becker, S. Brückner, J. Bergmann, J. Kobelke, M. Rothhardt // *Appl. Opt.* – 2009. – V. 48. – P. 1963-1968.
31. **Вартапетов, С. К.** Исследование формирования микрорельефа на поверхностях кристаллов ZnSe и CdSe при абляции излучением эксимерного KrF-лазера / С. К. Вартапетов, А. В. Захряпа, В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин, В. А. Михайлов, Ю. П. Подмарьков, И. Ю. Порофеев, Д. Е. Свиридов, Я. К. Скасырский, М. П. Фролов, И. М. Юткин // *Квантовая электроника* – 2016. – Т. 46. – № 10. – С. 903-910.

Глава 2. Оптические схемы записи решёток Брэгга интерферометрическим методом

В оптике интерференцией света называют перераспределение интенсивности света в результате взаимодействия (суперпозиции) нескольких когерентных световых волн. В результате этого явления возникают чередующиеся в пространстве максимумы и минимумы интенсивности. Такое распределение называется интерференционной картиной. В учебном пособии не содержится сведений из физической оптики и теории оптических приборов. Поэтому физические основы интерференции света подробно рассмотрены в книгах [1-3].

Лазерная интерферометрия – интенсивно развивающаяся область прикладной оптики и измерительной техники, имеющая широкую сферу применений как в научном эксперименте, так и в промышленной технологии [4]. Полученная интерференционная картина зависит от следующих факторов: способа разделения пучка света на взаимно когерентные лучи, их число и относительная интенсивность, а также от размеров источника оптического излучения и его спектрального состава. Методы получения когерентных пучков в интерферометре очень разнообразны, поэтому существует большое число различных конструкций интерферометров. По числу интерферирующих лучей оптические интерферометры можно разделить на многолучевые и двухлучевые. Многолучевые интерферометры используются главным образом как спектрометры высокой разрешающей силы для исследования тонкой структуры спектральных линий и определения их формы, а двухлучевые интерферометры являются в основном техническими приборами. При создании интерференционной картины для записи ВБР применяются соответственно двухлучевые интерферометры, которые и будут рассмотрены в настоящей главе.

2.1. Основные интерферометрические оптические схемы для записи решёток Брэгга

Впервые интерферометрический метод формирования ВБР через боковую поверхность был представлен в 1989 году (В. Морей и др.) [5]. Решётка Брэгга записывалась в германо-силикатном ОВ через боковую поверхность с помощью двух пересекающихся пучков лазерного излучения, характеристики которого описаны в первой главе учебного пособия. На рисунке 2.1 представлена функциональная схема записи ВБР.

Интерферометр с амплитудным делением пучка состоял из светоделителя (СД), разделяющего УФ излучение на два пучка равной интенсивности, которые впоследствии сводятся двумя зеркалами (M) для получения интерференции в плоскости установленного ОВ. После зеркал в обоих плечах интерферометра установлены цилиндрические линзы (ЦЛ) для увеличения плотности энергии в области записи решёток. Описанный метод раскрыл новые возможности для записи ВБР с различными длинами волн

угол пересечения пучков θ и, следовательно, меняли период интерференционной картины на 43,5 нм.

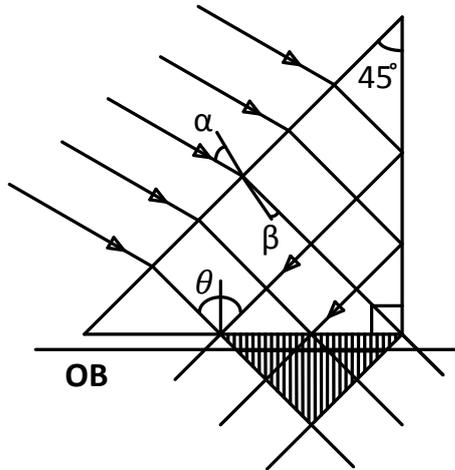


Рис. 2.3. Призменный интерферометр

В работе [13] авторы представили запись ВБР с помощью интерферометра Тальбота, состоящего из ФМ и двух сводящих зеркал. На поверхности ОВ создавалась интерференционная картина пересекающихся 1/-1 порядков дифракции. Наиболее распространенным интерферометром для записи ВБР является интерферометр Тальбота (рис. 2.4). Ввиду симметричности и минимального количества зеркал, такой интерферометр относительно прост в настройке и имеет малые потери. Недостатком этого интерферометра является то, что диаметр зеркал интерферометра должен значительно превышать длину записываемых решеток Брэгга, ввиду большого угла падения пучков на зеркала.

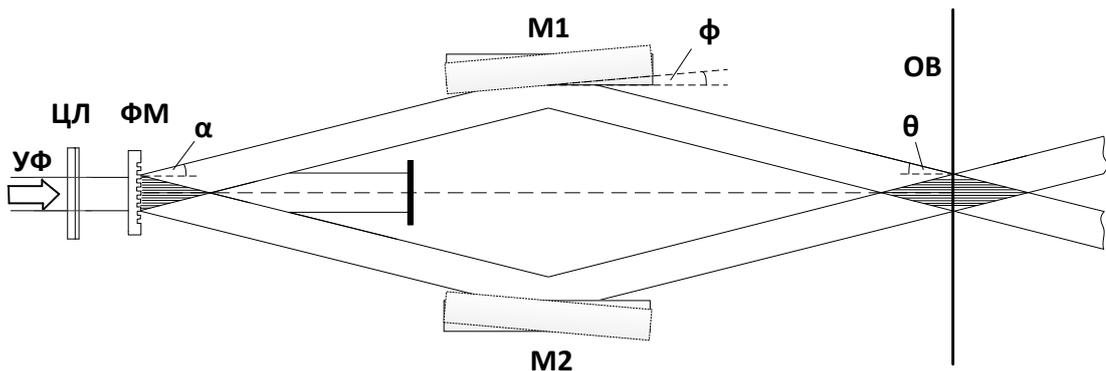


Рис. 2.4. Интерферометр Тальбота

Авторы работы [14] построили интерферометр, состоящий из фазовой маски (ФМ), используемой в качестве светоделиителя, и четырех зеркал (рис. 2.5), два из которых ($M1$, $M2$) зафиксированы под углом 45° к порядкам дифракции, а два находятся на подвижных основаниях ($M3$, $M4$), но также расположены близко к 45° по отношению к падающему излучению. Такая конфигурация имеет несколько большие габариты по отношению к

интерферометру Тальбота, сложнее в настройке и чувствительнее к отклонению оптической оси. Однако значительно увеличивает возможную длину, записываемых периодических структур.

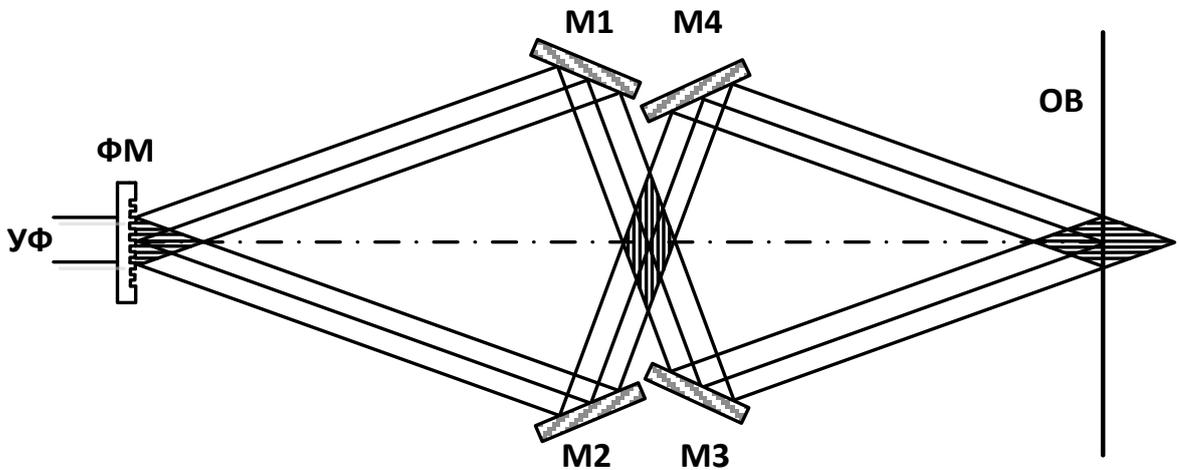


Рис. 2.5. Интерферометр на основе 2 подвижных и 2 стационарных зеркал

Этот недостаток отсутствует в «эллиптическом» интерферометре Тальбота [15]. Такая конфигурация позволяет расположить подвижные зеркала близко к углу 45° , таким образом, уменьшить размер пучка на зеркалах (рис. 2.6). В данной схеме отсутствует необходимость экранировать нулевой порядок дифракции. Однако такой интерферометр имеет несимметричное строение, что усложняет его юстировку.

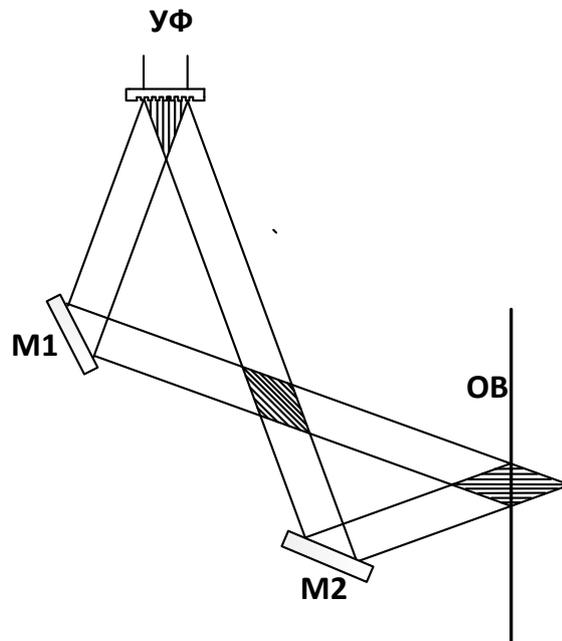


Рис. 2.6. Эллиптический интерферометр Тальбота

Конфигурация интерферометра Тальбота, представленная на рисунке 2.4, практичнее и стабильнее относительно всех выше представленных [16].

2.2. Интерферометры для записи решёток Брэгга в процессе вытяжки оптического волокна

У интерферометров, применяемых для записи ВБР, существует ряд преимуществ: возможность изменения в широком диапазоне периода интерференционной картины путем поворота зеркал; отсутствие непосредственного контакта оптических элементов схемы с ОВ, что позволяет производить запись ВБР непосредственно в процессе вытяжки световодов. Авторы работ [6,7] продемонстрировали запись ВБР интерферометрическим методом, применяя KrF эксимерный лазер типа генератор – усилитель. Использование импульсного источника излучения, позволило осуществлять формирование решёток Брэгга в процессе вытяжки волоконного световода [8,17]. Данная технология позволяет записывать протяжённые массивы с большим количеством брэгговских структур в широком диапазоне длин волн отражения. Преимущество записи ВБР непосредственно в процессе вытяжки ОВ состоит в том, что запись решетки производится без снятия защитного акрилатного покрытия, что, в свою очередь, сохраняет механические свойства волоконного световода.

Данный метод, производства массива брэгговских структур в ОВ, достаточно специфичен и обладает рядом требований:

- одноимпульсный режим воздействия;
- высокая плотность энергии в лазерном пучке;
- высокая стабильность параметров лазерного излучения;
- синхронизация оборудования;
- компенсация отклонения ОВ;
- диагностика спектральных характеристик ВБР непосредственно в процессе вытяжки ОВ;
- маркировка решёток.

Впервые были опубликованы результаты по записи ВБР одиночным импульсом эксимерного лазера в процессе вытяжки ОВ в работе [17]. Авторы показали возможность записи массива ВБР типа I и II в процессе вытяжки ОВ до нанесения слоев защитного покрытия.

В рассматриваемой работе источником излучения для записи массивов ВБР являлась KrF эксимерная лазерная система Lambda Physik EMG 150 MSC. Длительность лазерного импульса составляла 20 нс. Лазерный пучок размерами 20×6 мм² транспортировался через восемь зеркал на расстояние 20 м в интерферометр, установленный непосредственно на башню вытяжки между датчиком диаметра волокна и фильерой для нанесения защитного покрытия.

Диагностика спектральных характеристик производилась в реальном времени через свободный конец волокна, подключенный к широкополосному источнику излучения с волоконным выходом и оптическому анализатору спектра. Скорость вытяжки ОВ варьировалась от 3 до 23 м/мин при осевом смещении на 1 нм (при 3 м/мин) в течение длительности импульса. В

результате были записаны ВБР типа I с коэффициентами отражения до 2% и ВБР типа II с коэффициентом отражения около 100%.

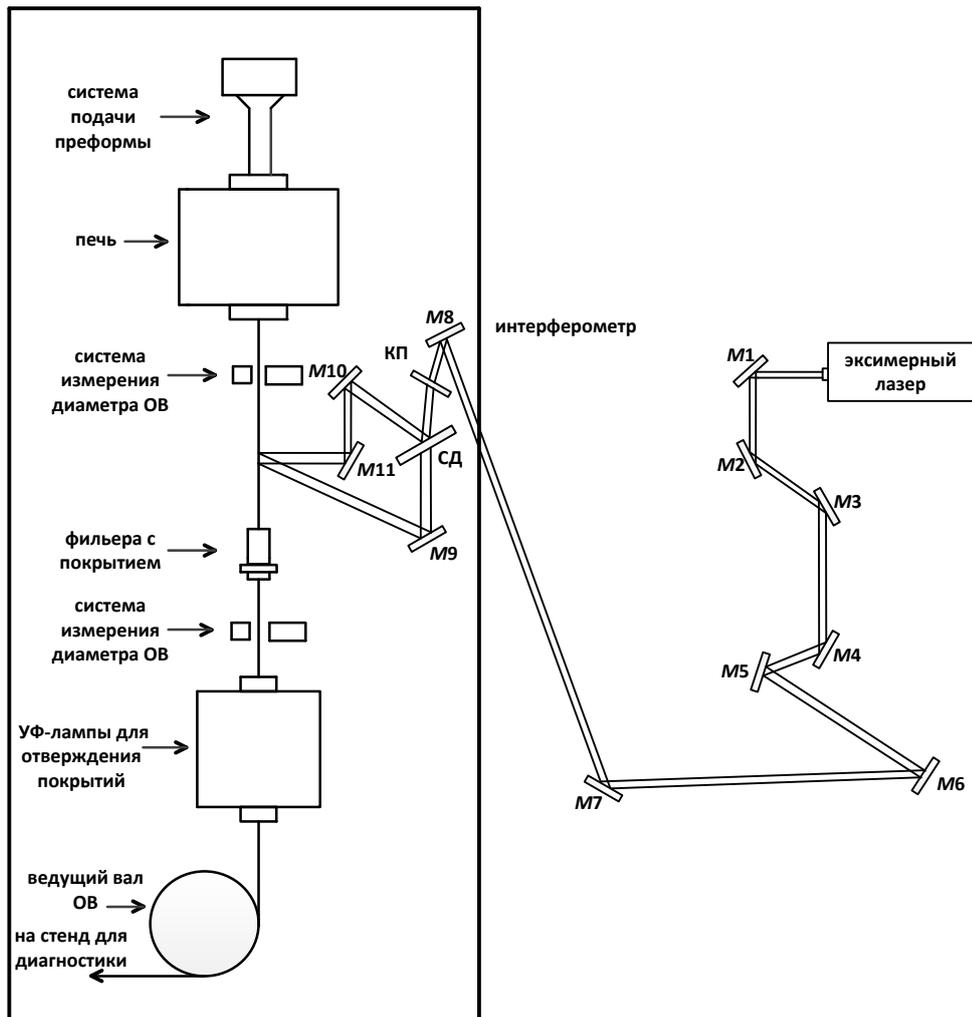


Рис. 2.7. Запись массивов ВБР на башне вытяжки оптического волокна

Позднее в работе [8] впервые представили результаты записи ВБР на различных длинах волн отражения брэгговского резонанса в процессе вытяжки ОВ. Для этого были использованы моторизованные поворотные подвижки и линейный транслятор, которые управлялись с компьютера.

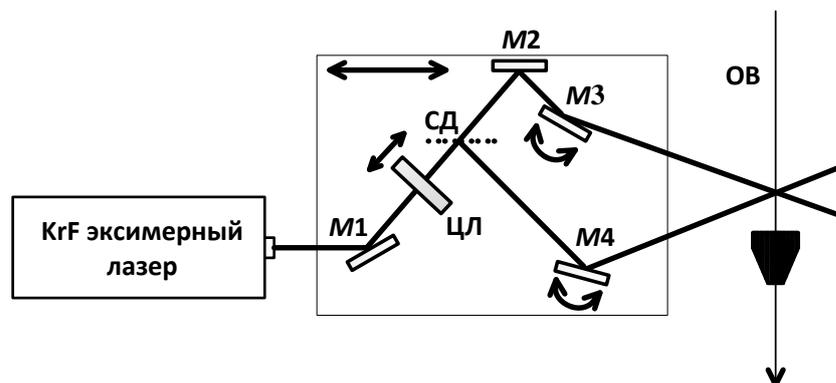


Рис. 2.8. Схема записи ВБР с моторизованным интерферометром на вытяжке оптического волокна

В работе [18] авторы продемонстрировали результаты записи массивов ВБР на башне вытяжки. Запись проводилась с использованием моторизованного интерферометра Тальбота и KrF эксимерной лазерной системы Coherent COMPexPro 150T. В результате были получены решетки с коэффициентом отражения до 40% для ВБР типа I и около 100% для ВБР типа II в ОВ с повышенной концентрацией GeO₂.

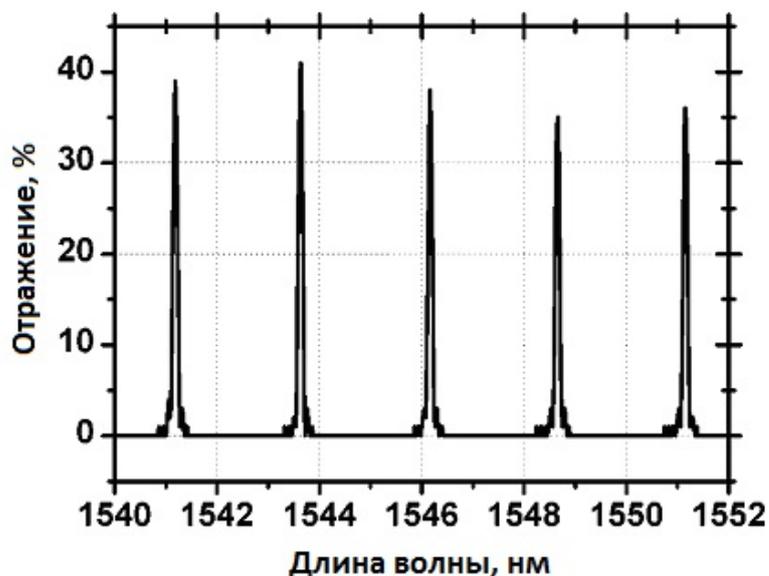


Рис. 2.9. Спектр отражения массива из 5 ВБР

На рисунке 2.9 продемонстрирован спектр массива ВБР типа I со спектральным интервалом 2,5 нм, полученный в процессе вытяжки световода. Подобные массивы используют для построения распределенных датчиков температуры с мультиплексированием по длинам волн [19,20].

2.3. Интерферометр Тальбота

Расчетная схема на основе интерферометра Тальбота для записи ВБР показана на рисунке 2.10.

Зеркала на поворотных платформах (4) и ФМ (2) располагаются на единой плите (6), установленной на линейной подвижке. Таким образом, путём поворота зеркал на нужный угол и перемещением плиты L , обеспечивается совмещение интерферирующих пучков в области записи и получение интерференционной картины с требуемым периодом.

Исходными данными для расчёта настроек интерферометра являются:

- λ – длина волны излучения лазера, используемого для записи ВБР;
- d – период фазовой маски;
- f – фокусное расстояние цилиндрической линзы;
- b – расстояние между центрами поворотных зеркал;
- w_0 – ширина и h – высота лазерного пучка, определяемые размером диафрагмы;
- B_0 – нулевое положение плиты интерферометра, при котором используемые пучки (1 и -1 порядки дифракции) сводятся в плоскости

ОВ при отражении от зеркал, расположенных параллельно друг другу (угол $\varphi = 0$);

- a_{00} – расстояние от нулевого положения цилиндрической линзы до ФМ, установленной в положении B_0 ;
- a_{01} – смещение цилиндрической линзы относительно нулевого положения $CL0$;
- E – энергия лазерного пучка.

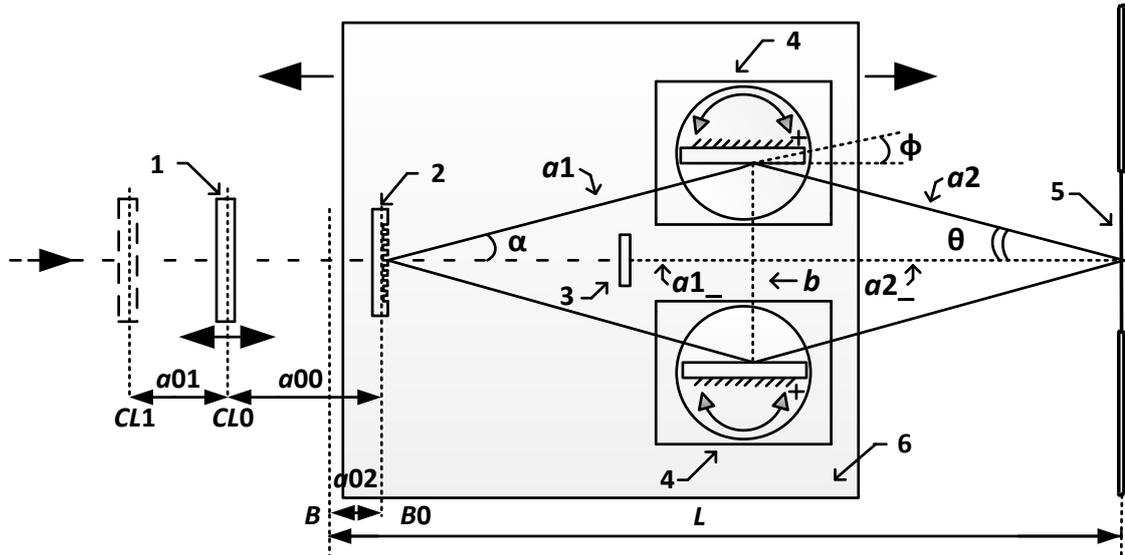


Рис. 2.10. Расчётная схема для записи ВБР на основе интерферометра Тальбота, где 1 – цилиндрическая линза на линейной подвижке; 2 – фазовая маска; 3 – экран для 0-го порядка дифракции ФМ; 4 – зеркала $\varnothing 76,2$ мм на поворотной платформе; 5 – оптическое волокно; 6 – плата с интерферометром Тальбота на линейной подвижке

Расчётными параметрами являются:

- φ – угол поворота каждого из зеркал относительно их параллельного расположения друг к другу;
- a_{02} – смещение плиты с интерферометром Тальбота относительно нулевого положения B_0 ;
- Q – плотность энергии лазерного излучения в области записи ВБР.

В случае если известен эффективный показатель преломления ОВ n_{eff} , период интерференции пучков Λ определяется соотношением:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{br}}{2n_{eff}}, \quad (2.1)$$

где λ_{br} – центральная длина волны брэгговского резонанса.

Учитывая длину волны лазера, с помощью которого производится запись, и период фазовой маски, рассчитывается угол дифракции для ± 1 порядка α :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{k \times \lambda}{d}\right), \quad (2.2)$$

где k – порядок дифракции, d – период фазовой маски, λ – длина волны излучения лазера.

Угол падения лучей на волоконный световод θ для получения требуемого периода интерференционной картины Λ выражается соотношением:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\Lambda}\right). \quad (2.3)$$

Угол падения лучей на ОВ θ и угол поворота зеркал φ связаны следующим соотношением:

$$\varphi = \frac{\theta - \alpha}{2}. \quad (2.4)$$

Изменение угла поворота зеркал ведет к изменению периода интерференционной картины, а значит, и к изменению периода решетки.

С помощью формулы 2.5 определяем величину сдвига плиты при изменении угла поворота зеркал. Соответствующий сдвиг необходимо вносить, чтобы ОВ оставалось в области интерференционной картины.

$$a_{02} = \frac{b}{2 \tan(\alpha)} - \frac{b}{2 \tan(\theta)}. \quad (2.5)$$

Плотность энергии на ОВ в области записи играет значительную роль в обеспечении различных режимов записи. Обычно под этим понимается суммарное значение плотностей энергии двух порядков. Следует понимать, что плотность энергии пучков в области максимума интерференционной картины двукратно превышает это значение.

В зависимости от требуемой плотности энергии возможно производить запись ВБР либо в прямом пучке, либо с использованием фокусировки излучения. В случае использования цилиндрической линзы можно рассчитать плотность энергии Q_{cl} в области записи ВБР:

$$Q_{cl} = \frac{E}{S_{cl}}, \quad (2.6)$$

где S_{cl} – площадь лазерного пучка в области записи.

Суммарное расстояние от цилиндрической линзы до ОВ (A) можно рассчитать так:

$$A = a_{00} + a_{01} + a_{02} + \frac{b}{2 \tan(\alpha)} + \frac{b}{2 \tan(\theta)}. \quad (2.7)$$

Таким образом, можно вычислить S_{cl} :

$$S_{cl} = \frac{w_0 \times (f - A)}{f}. \quad (2.8)$$

При записи в прямом пучке (без цилиндрической линзы), плотность энергии Q равна:

$$Q = \frac{E}{S}, \quad (2.9)$$

где S – площадь прямого пучка:

$$S = w_0 \times h. \quad (2.10)$$

При использовании ОВ с неизвестным n_{eff} существует возможность его экспериментального определения. Для этого производится запись ВБР для ряда значений периода интерференционной картины, т.е. задаётся период интерференционной картины Λ , производится запись ВБР, после чего измеряется её длина волны брэгговского резонанса и определяется n_{eff} :

$$n_{eff} = \frac{\lambda_{br}}{2 \times \Lambda}. \quad (2.11)$$

Если определить n_{eff} для различных значений периода интерференционной картины и построить зависимость n_{eff} от длины волны брэгговского резонанса, то, аппроксимируя полученные значения, можно получить n_{eff} для записи решётки с требуемой длиной волны брэгговского резонанса. После чего расчёты производятся согласно стандартной процедуре, начиная с формулы (2.1).

Список использованной литературы (Глава 2)

1. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф // М.: Наука, 1973. – 720 с.
2. **Ландсберг, Г. С.** Оптика // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
3. **Годжаев, Н. М.** Оптика // М.: Высшая школа, 1977 – 432 с.
4. **Коронкевич, В. П.** Лазерные интреферометрические и дифракционные системы / В. П. Коронкевич, А. Г. Полещук, А. Г. Седухин, Г. А. Ленкова // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34. – № 1. – С. 1-22.
5. **Morey, W. W.** Formation of Bragg gratings in optical fibres by a transverse holographic method / W. W. Morey, W. H. Glenn // Optics Letters. – 1989. – V. 14. – № 15. – P. 823-825.
6. **Askins, C. G.** Fibre Bragg reflectors prepared by a single excimer pulse / C. G. Askins, T.-E. Tsaim, G. M. Williams, M. A. Puttnam, Y. M. Bashkansky, E. J. Friebele // Optics Letters. – 1992. – V. 17. – № 11. – P. 833-835.
7. **Archambault, J.-L.** High reflectivity and narrow bandwidth fibre gratings written by single excimer laser pulses / J.-L. Archambault, L. Reekie, P. St. J. Russell // Electronics Letters. – 1993. – V. 29. – P. 453-455.
8. **Askins, C. G.** Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower / C. G. Askins, M. A. Puttnam, G. M. Williams, E. J. Friebele // Optics Letters. – 1994. – V. 19. – № 2. – P.147-149.
9. **Kashyap, R.** All-fibre narrowband reflection gratings at 1500 nm / R. Kashyap, J. Armitage, R. Wyatt, S. T. Davey, D. L. Williams // Electronics Letters. – 1990. – V.26 – №. 11 – P. 730-732.
10. **Fertein, E.** Shifts in the resonance wavelengths of Bragg gratings in the course of writing or bleaching experiments by UV illumination within a germanosilicate optical fibre / E. Fertein, S. Legoubin, M. Douay, S. Canon, P. Bernage, P. Niay, F. Bayon, T. Georges // Electronics Letters. – 1991. – V. 27. – № 20. – P. 1838-1839.
11. **Legoubin, S.** Formation of moire grating in core of germanosilicate fibre by transverse holographic double exposure method / S. Legoubin, E. Fertein, M. Douay, Bernage, P. Niay, F. Bayon, T. Georges // Electronics Letters. – 1991. – V. 27. – № 21. – P. 1945-1947.
12. **Chandra, S.** Prism-dye laser / S. Chandra, N. Takeuchi, S. R. Hartmann // Appl. Phys. Lett. – 1972. – V. 21. – № 4. – P. 144-146.
13. **Bartelt, H.** Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures / H. Bartelt, K. Schuster, S. Unger, C. Chojetzki, M. Rothhardt, I. Latka // Applied Optics. – 2007. – V. 46. – № 17. – P. 3417-3424.
14. **Li, C.** Changing photo-written Bragg wavelengths of fiber grating via one phase mask and four mirrors / Y. Lu, S. Wu, Q. Su, C. Huang // Optics & Technology – 2004. – V. 36. – P. 459-461.
15. **Pissadakis, S.** An elliptical Talbot interferometer for fiber Bragg grating fabrication / S. Pissadakis, L. Reekie // Rev. Sci. Instrum. – 2005. – V. 76. – № 066101. – P. 1-3.

16. **Gribaev, A. I.** Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer / A. I. Gribaev, I. V. Pavlishin, A. M. Stam, R. F. Idrisov, S. V. Varzhel, K. A. Konnov // *Opt Quant Electron.* – 2016. – V. 48. – № 540. – P. 1-7.
17. **Dong, L.** Single pulse Bragg gratings written during fibre drawing / L. Dong, J.-L. Archambault, L. Reekie, P. St. J. Russell, D. N. Payne // *Electronics Letters.* – 1993. – V. 29. – № 17 – P. 1577-1578.
18. **Chojetzki, C.** High-reflectivity draw-tower fiber Bragg gratings—arrays and single gratings of type II / C. Chojetzki, M. Rothhardt, J. Ommer, S. Unger, K. Schuster, H.-R. Mueller // *Opt. Eng. Lett.* – 2005. – V. 44. – № 6 (060503). – P. 1-2.
19. **Arkwright, J. W.** An inherently temperature insensitive fiber Bragg grating force sensor for in-vivo applications / J. W. Arkwright, L. Parkinson, A. Papageorgiou // *Proc. of SPIE.* – 2017. – V. 10058. – № 100580N. – P. 1-6.
20. **Lindner, E.** Draw Tower Fiber Bragg Gratings and their use in sensing technology / E. Lindner, J. Mörbitz, C. Chojetzki, M. Becker, S. Brückner, K. Schuster, M. Rothhardt, H. Bartelt // *Proc. of SPIE.* – 2011. – V. 8028. – № 80280C. – P. 1-7.

Глава 3. Лабораторная установка по записи волоконных решёток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота и KrF эксимерной лазерной системы

3.1. Описание лабораторной установки

Разработанная лабораторная установка интерферометрической записи ВБР в ОВ представлена на рисунке 3.1.

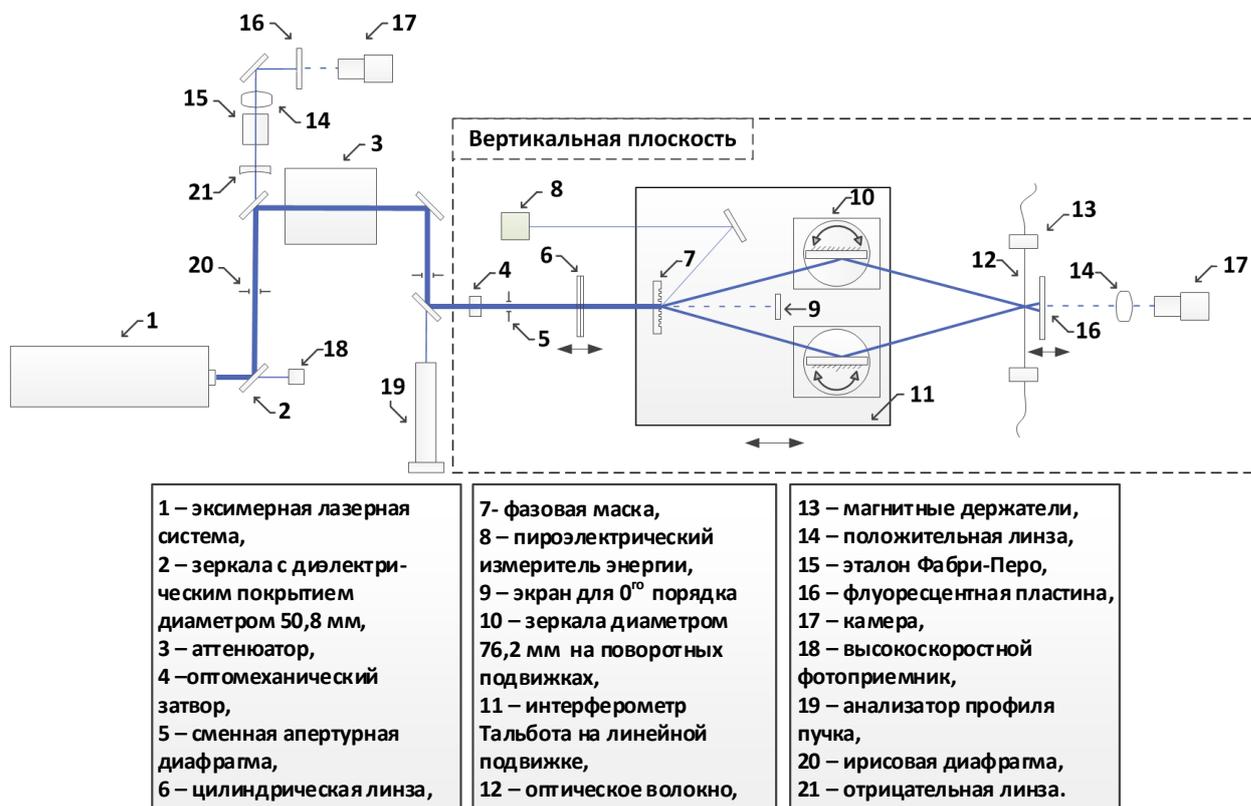


Рис. 3.1. Функциональная схема записи ВБР с использованием интерферометра Тальбота

Основными элементами являются:

- 1) KrF эксимерная лазерная система, подробное описание которой представлено в главе 1.
- 2) Транспортирующая оптическое излучение система зеркал 2.

Данная система предназначена для транспортировки лазерного пучка до интерферометра Тальбота. Система зеркал была построена геометрически таким образом, чтобы далее внедрить в лабораторный стенд все узлы контроля и ввести излучение He-Ne лазера для юстировки оптических элементов схемы.

- 3) Интерферометр Тальбота.

Фазовая маска 7 и поворотные подвижки с зеркалами 10 расположены на единой плите 11, установленной на линейной подвижке с ходом в 100 мм, в совокупности составляют интерферометр Тальбота. ФМ производства Ibsen Photonics с постоянным периодом 1000 шт/мм служит в качестве дифракционного элемента. Используемая голографическая фазовая пропускающая решётка изготовлена электронно-лучевым травлением и

имеет прямоугольный профиль для обеспечения максимальной дифракционной эффективности в +1 и -1 порядках дифракции [1]. На рисунке 3.2 представлено экспериментально полученное распределение энергии по порядкам дифракции проходящего через ФМ лазерного пучка. Энергия каждого порядка нормирована на энергию падающего на ФМ лазерного пучка.

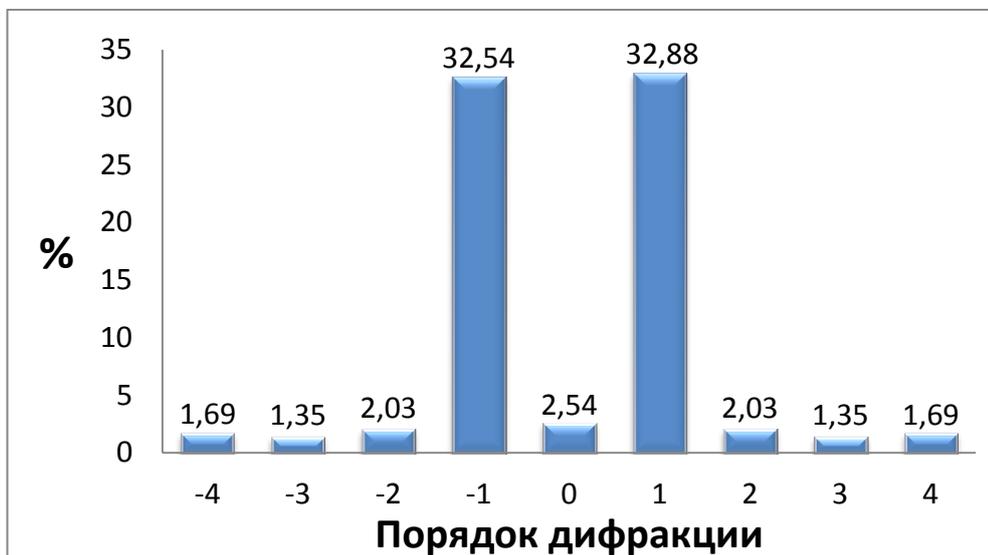


Рис. 3.2. Распределение энергии пучка по порядкам при дифракции на фазовой маске

Цилиндрическая линза 6 (рис. 3.1) с фокусным расстоянием 500 мм, установленная на линейном трансляторе, используется для увеличения плотности энергии в области записи решеток. Для плавного изменения энергии лазерного излучения в лабораторном стенде установлен моторизованный аттенюатор 3. Для определения плотности энергии в пучке, воздействующем на ОВ 12, установленное в магнитных держателях 13, применяется измеритель энергии 8.

В связи с частотным режимом работы лазерной системы 1 в лабораторный стенд включен оптомеханический затвор 4 на основе шагового двигателя, который позволяет в режиме синхронизации выделять один лазерный импульс при рабочей частоте до 20 Гц (для возможности записи ВБР в одноимпульсном режиме) и определенное количество импульсов при многоимпульсной экспозиции.

Ирисовые диафрагмы 20 предназначены для точного контролируемого проведения оптической оси перед началом записи ВБР. Для точной установки и юстировки диафрагм, а также последующего определения оптической оси применяется анализатор профиля пучка. Для изменения физической длины записываемых периодических структур включена в стенд сменная апертурная диафрагма 5.

Негативно сказываются на эффективности записи ВБР воздушные потоки, в частности, на распределении энергии в пучке. Для минимизации воздушных потоков, которые искажают однородность энергии в пучке, применяется короб из органического стекла над всей оптической схемой.

Также наличие короба позволяет минимизировать наличие отражённых и паразитных бликов в помещении, что увеличивает безопасность при работе с настоящей установкой.

Далее подробнее рассмотрим системы контроля, используемые в лабораторной установке.

Для определения характеристик лазерного пучка и контроля основных узлов оптической схемы в процессе записи ВБР применяются следующие системы:

- система оперативного контроля ширины линии лазерного излучения на базе интерферометра Фабри-Перо;
- система контроля распределения энергии в пучке с использованием коммерчески доступного анализатора профиля пучка;
- система контроля энергии лазерных импульсов в области записи ВБР;
- система контроля положения ОВ относительно лазерного излучения.

Принципиальная схема системы оперативного контроля ширины линии лазерного излучения показана на рисунке 3.3.

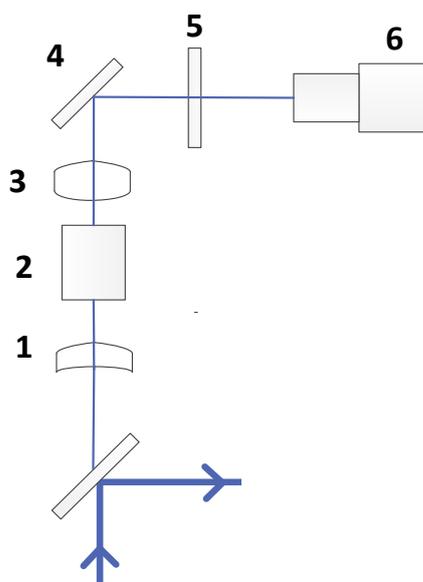


Рис. 3.3. Система контроля ширины линии лазерного излучения, где 1 – рассеивающая линза, 2 – эталон Фабри-Перо, 3 – собирающая линза, 4 – зеркало, 5 – флуоресцентная пластина, 6 – камера

Для создания интерференционной картины с высокой контрастностью требуется излучение с повышенной временной и пространственной когерентностью. При ухудшении контраста снижается эффективность записи ВБР. В связи с этим в состав стенда включена система контроля ширины спектральной линии излучения. В качестве спектрального прибора применяется ИФП 2. В нашем случае ИФП состоит из двух взаимно параллельно выставленных отражательных пластин, обращённых друг к другу на расстоянии 5 мм. Так как ИФП применяется для параллельных и расходящихся пучков [2], перед ним установлена рассеивающая линза 1. Через транспортирующее зеркало проходит порядка 0,4% падающей энергии,

которой достаточно для получения интерференционной картины с ИФП. Для определения ширины излучения лазера измерение диаметров колец интерференционной картины происходит в фокусе собирающей линзы 3, расположенной после ИФП. Строится изображение интерференционных колец на флуоресцентной пластине 5 (см. рис. 1.4), регистрируемое камерой 6. С камеры интерференционная картина выводится на монитор персонального компьютера (ПК). В процессе работы наблюдается картина интерференции, при ухудшении контраста и увеличении ширины колец производится подстройка синхронизации лазерной системы или резонатора генератора.

ИФП обладает ограниченной областью дисперсии, которая характеризует максимальный интервал длин волн $\Delta\lambda$, при котором не происходит перекрытия интерференционных колец соседних порядков. При наблюдении интерференции излучения со спектральной шириной $> \Delta\lambda$, интерференционная картина представляет собой равномерно освещённую область и не позволяет анализировать спектральные характеристики излучения. Ширина области дисперсии определяется из условия наложения кольца $(m+1)$ -го порядка для длины волны λ и кольца m -го порядка для длины волны $\lambda + \Delta\lambda$ [3]:

$$m(\lambda + \Delta\lambda) = (m + 1)\lambda, \quad (3.1)$$

откуда

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m} \approx \frac{\lambda^2}{2L}, \quad (3.2)$$

где L – расстояние между отражающими поверхностями или база интерферометра.

Таким образом, при спектральной ширине излучения, превышающей $\Delta\lambda$, эталон Фабри-Перо с базой L не подходит для анализа спектральной ширины излучения. ИФП с базой 5 мм, то есть расстоянием между отражающими пластинами, имеет область дисперсии 6,16 пм. С помощью анализа интерференционной картины можно измерить спектральную ширину излучения источника по формуле 3.3:

$$\Delta\lambda = \frac{D_p(D_{p2}-D_{p1})\lambda}{\frac{f^2 4n}{n_0^2}}, \quad (3.3)$$

где D_{p1} и D_{p2} – внутренний и внешний диаметр кольца p соответственно ($p1$ и $p2$), D_p – средний диаметр соответствующего кольца, f – фокус линзы, n и n_0 – показатели преломления окружающей среды и среды, заключенной между плоскопараллельными пластинами ИФП, соответственно (в нашем случае, n и n_0 равны и равны 1).

В процессе работы было установлено, что распределение энергии в пучке изменяется во время длительной работы лазерной системы, что выявило необходимость непрерывного контроля распределения энергии в пучке. Система контроля распределения энергии в пучке детектирует изменения и выводит на экран ПК его изображение (см. рис. 1.4). Анализатор профиля пучка, входящий в стенд, позволяет также качественно проводить

юстировку лазерной системы и элементов оптической схемы по распределению энергии в лазерном импульсе. Анализатор профиля пучка установлен в оптической схеме таким образом, чтобы наблюдать распределение энергии в пучке непосредственно в процессе записи ВБР. Для захвата изображения используется внешняя синхронизация.

Система контроля энергии лазерных импульсов в области записи ВБР представлена на рисунке 3.4.

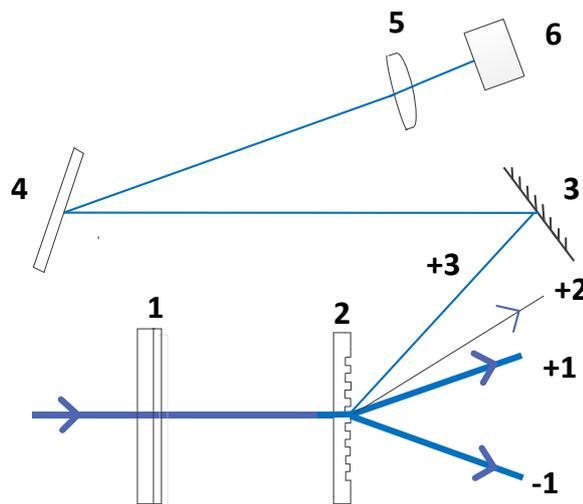


Рис. 3.4. Система контроля энергии пучка, где 1 – цилиндрическая линза, 2 – фазовая маска, 3 – алюминиевое зеркало, 4 – зеркало с диэлектрической поверхностью, 5 – собирающая линза, 6 – пироэлектрический измеритель энергии

Для определения плотности энергии пучка, воздействующего на ОВ, требуется измеритель энергии 6. Сенсор расположен таким образом, чтобы контролировать энергию каждого пучка, участвующего в процессе записи ВБР. Фазовая маска разделяет энергию проходящего излучения на порядки дифракции под различными углами. Для измерения плотности энергии, отводится излучение +3 порядка дифракции зеркалами 3 и 4. Далее фокусируется линзой 5 для полного попадания в апертуру чувствительной области сенсора. Перед работой производится калибровка сенсора с помощью другого измерителя энергии, который измеряет энергию 1 и -1 порядков дифракции. Зная значение энергии порядков участвующих в записи ВБР, легко определить отношение между ними и другими порядками дифракции. Вычислив реальную энергию пучка E в области записи ВБР и зная его площадь S , с помощью формулы (3.4) определяем:

$$Q = \frac{E}{S}. \quad (3.4)$$

Таким образом, определяем плотность энергии в импульсе Q в мДж/см². Если при записи ВБР излучение фокусируется цилиндрической линзой, то плотность энергии определяется с помощью формул (2.6-2.8), подробно описанных в главе 2.

Система по контролю положения ОВ в плоскости интерференционной картины позволяет устанавливать световод в центре интерференционной

картины. Это достигается с помощью установленной флуоресцентной пластины в плоскости ОВ. На рисунке 3.5 представлена рассматриваемая система контроля.

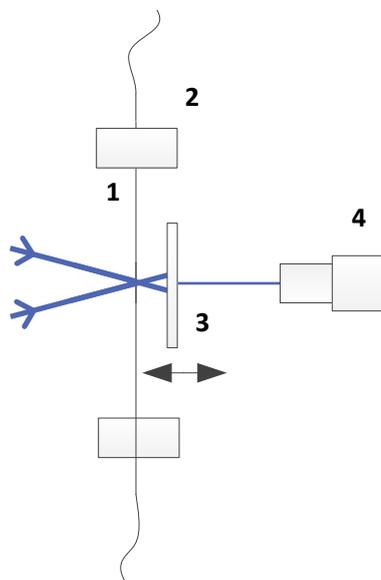


Рис. 3.5. Принципиальная схема системы контроля положения волоконного световода относительно лазерного пучка, где 1 – оптическое волокно, 2 – магнитные держатели, 3 – флуоресцентная пластина, 4 – камера с синхронизацией

Также данная система позволяет путём перемещения флуоресцентной пластины 3 в плоскость ОВ точно определять полное совмещение интерферирующих пучков, ограничив апертуру до 1 мм в диаметре с помощью ирисовой диафрагмы. Регистрация данных изображений производится камерой с синхронизацией и выводится на экран ПК (рис. 3.6).

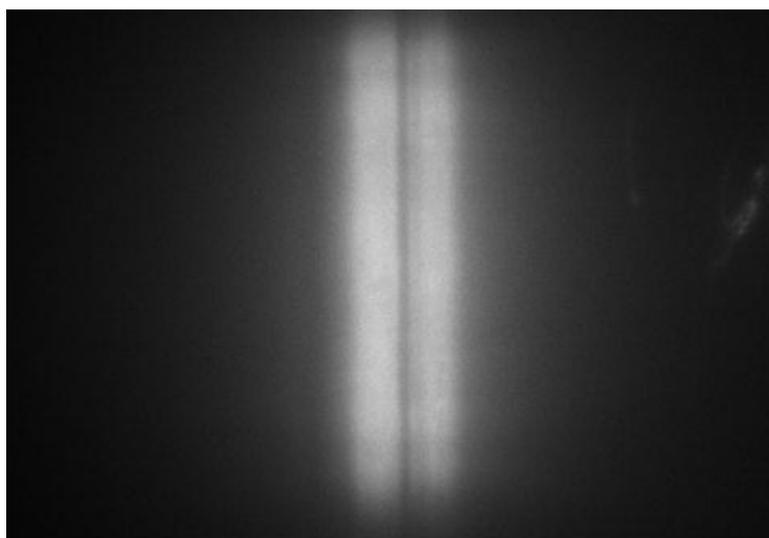


Рис. 3.6. Положение оптического волокна относительно лазерного пучка

Представленные системы контроля позволяют достигать высокой стабильности параметров лазерного излучения, и осуществлять эффективную запись волоконных брэгговских дифракционных структур.

3.2. Возможности по записи решёток Брэгга на лабораторной установке

Длина волны брэгговского резонанса решётки определяется условием Брэгга:

$$\lambda_{br} = 2 \times n_{eff} \times \Lambda, \quad (3.5)$$

где n_{eff} – эффективный показатель преломления ОВ, Λ – период решетки.

Минимальный шаг поворота применяемых подвижек 9, на которые установлены зеркала интерферометра Тальбота, позволяет изменять длину волны брэгговского резонанса волоконной решетки с точностью 0,1 нм.

Параметр L накладывает ограничение по максимальному повороту зеркал (см. рис. 2.10). Линейный ход используемой подвижки 100 мм, а максимальное изменение периода интерференционной картины равно 284 нм. Интервал перестройки периода интерференционной картины интерферометра Тальбота охватывает широкий диапазон длин волн отражения брэгговского резонанса записываемых решёток (см. рис. 3.7).

R, отн. ед.

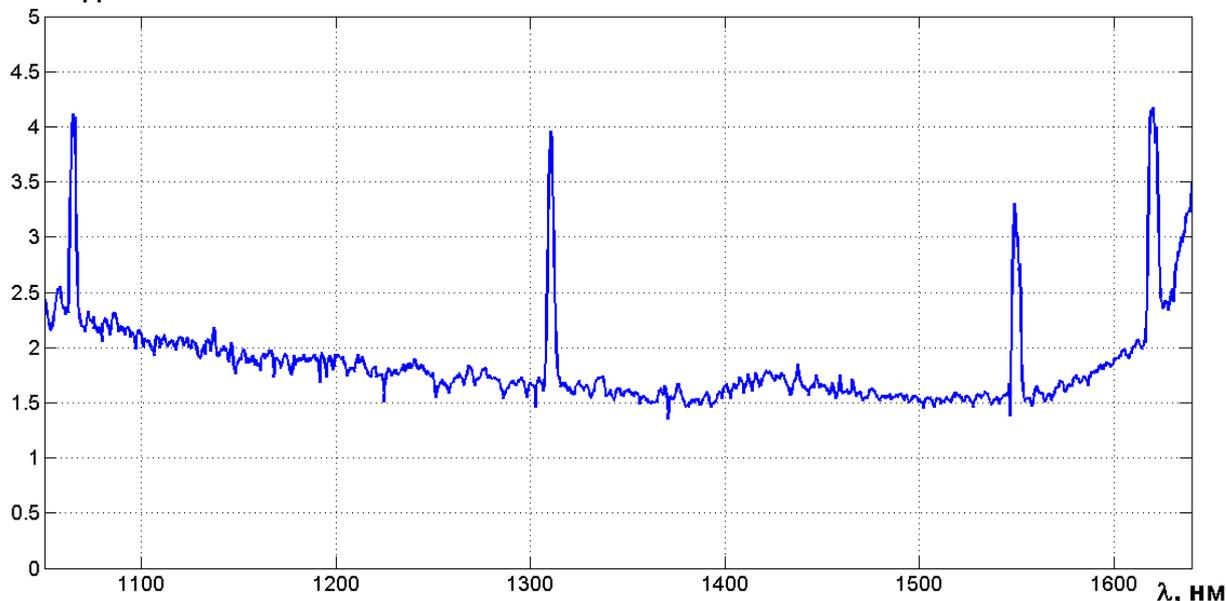


Рис. 3.7. Спектр массива ВБР, показывающий спектральный диапазон перестройки интерферометра Тальбота

При этом существует возможность расширить диапазон путём дополнительного смещения плиты, на которой установлен интерферометр Тальбота, или с помощью перемещения узла крепления ОВ.

В связи с геометрической конфигурацией интерферометра Тальбота, для полного отражения рабочих пучков излучения от зеркал диаметром 76,2 мм, размер пучка не должен превышать 14 мм, что следует из формулы 3.6.

$$c = \frac{h \times \sin(90^\circ - \theta)}{\sin(\theta + \varphi)}, \quad (3.6)$$

где c – размер занятой излучением зоны на зеркалах (высота пучка на зеркалах), h – высота пучка, θ – угол падения пучка на зеркала, φ – угол поворота зеркал.

Для определения спектральных характеристик ВБР используется оптический анализатор спектра с разрешающей способностью в 0,02 нм и широкополосный источник излучения. Размер сменной апертурной диафрагмы ограничивает физическую длину записываемых ВБР в диапазоне от 1 до 14 мм. Это позволяет получать ВБР с шириной спектра на полувысоте от 0,08 до 0,7 нм при использовании ФМ с постоянным периодом. Коэффициент отражения записываемых решёток резко зависит от фоточувствительности ОВ и режима записи. Самыми распространёнными методами повышения фоточувствительности волоконного световода являются легирование сердцевины диоксидом германия (GeO_2) в процессе изготовления заготовки [4] и водородная обработка ОВ в камере под давлением [5]. В настоящей работе представлены результаты записи ВБР в ОВ производства НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С. И. Вавилова» с концентрацией GeO_2 в сердцевине световода 12 мол.%.

Зависимость ширины спектра отражения ВБР с периодом модуляции ПП 535 нм на полувысоте от физической длины представлена на рисунке 3.8. Плотность энергии в импульсе на ОВ составила около 300 мДж/см^2 , время экспозиции изменялось в зависимости от достижения определенного коэффициента отражения.

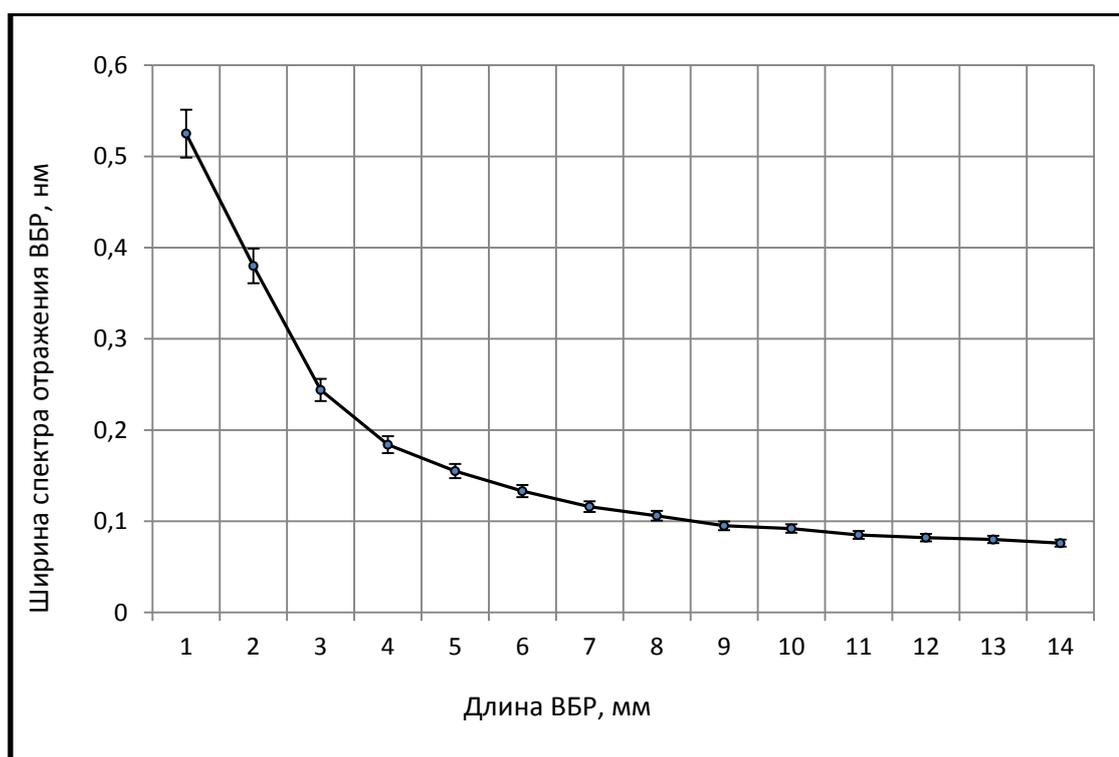


Рис. 3.8. Зависимость ширины спектра отражения ВБР на полувысоте от физической длины решетки

Зависимость коэффициента отражения ВБР с периодом модуляции ПП 535 нм от физической длины решетки представлена на рисунке 3.9. Плотность энергии в импульсе на ОВ составила около 130 мДж/см^2 , время экспозиции 30 сек, частота повторения импульсов 10 Гц.

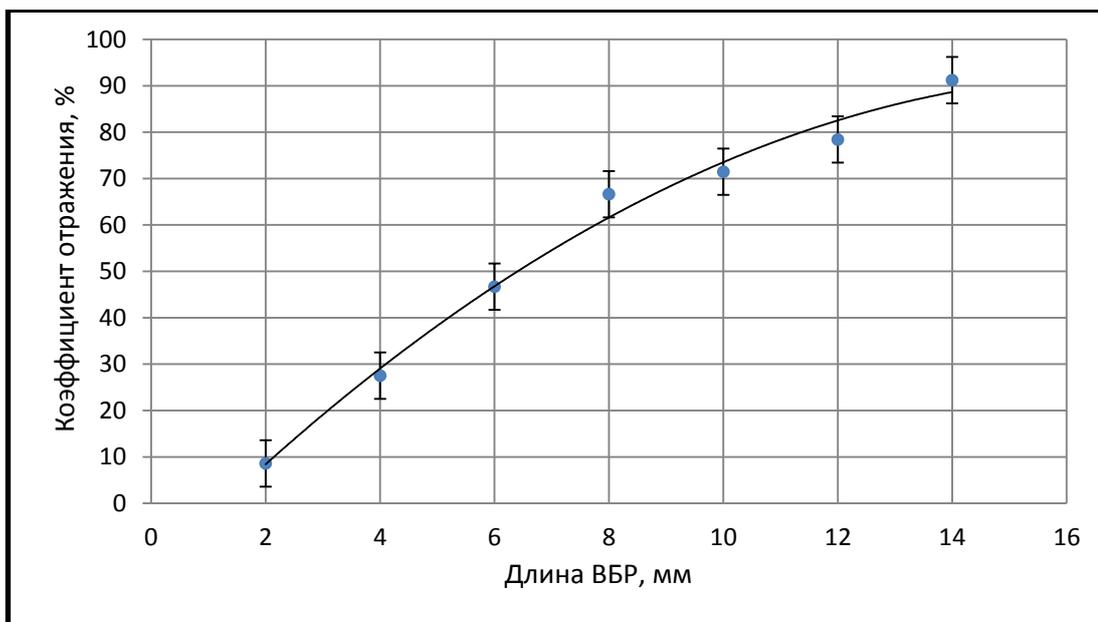


Рис. 3.9. Зависимость коэффициента отражения ВБР от физической длины решетки

На рисунке 3.10 представлен спектр отражения ВБР типа I длиной 14 мм, записанной одиночным импульсом в изотропном ОВ LBL-1550-F производства FBGS Technologies GmbH с концентрацией GeO_2 в сердцевине световода 20 мол.%.

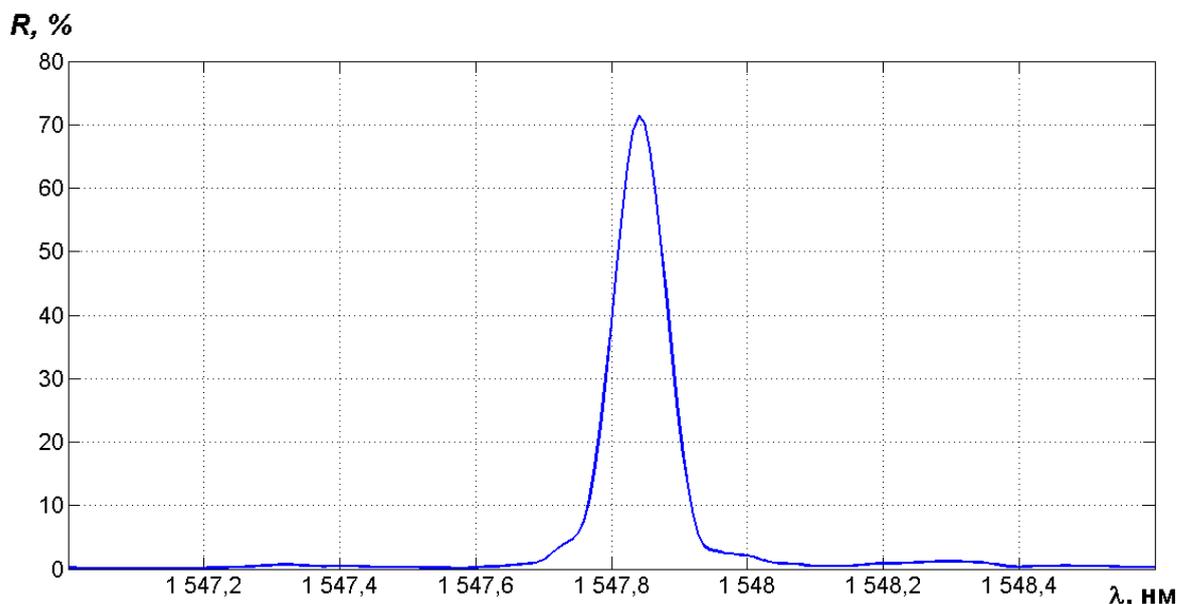


Рис. 3.10. Спектр ВБР, записанной одиночным импульсом

В многоимпульсном режиме установка позволяет записывать ВБР с коэффициентами отражения близкими к 100%.

На рисунке 3.11 представлен массив из 16 ВБР со спектральными интервалами равными 2,4 нм. На едином отрезке ОВ были записаны ВБР многоимпульсной экспозицией, плотность энергии в импульсе на поверхности ОВ составляла 200 мДж/см^2 . Расстояние между решётками массива могут варьироваться в зависимости от решаемых задач.

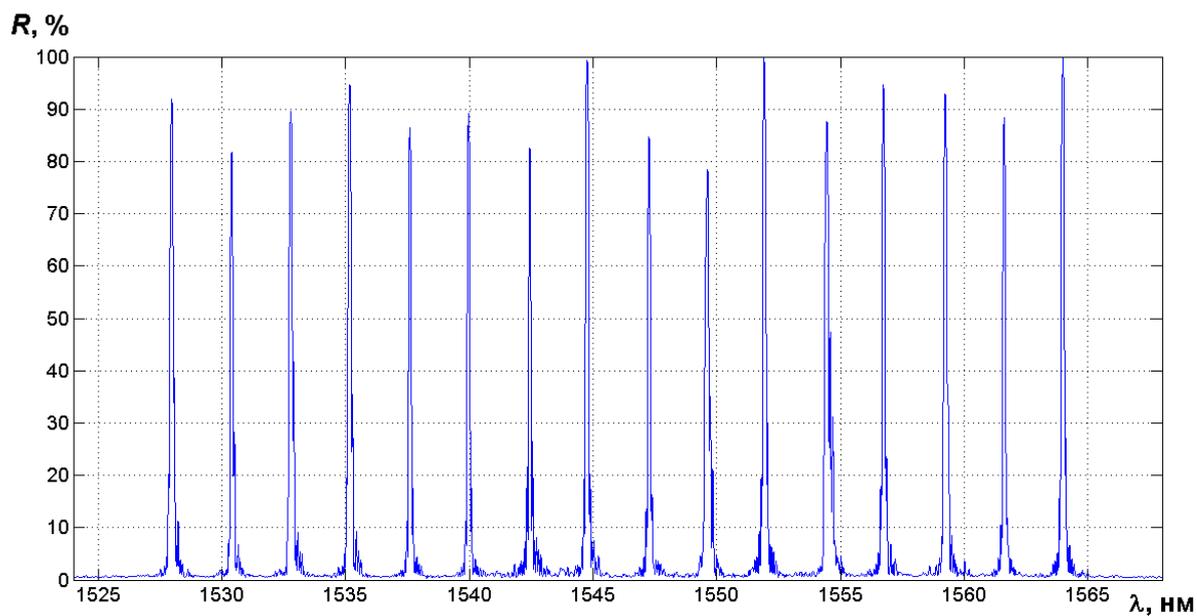


Рис. 3.11. Спектр массива ВБР

Записанные одиночные ВБР и массивы решеток на представленной установке находят практическое применение как чувствительные элементы и отражающие зеркала для волоконно-оптических датчиков [6-8].

Список использованной литературы (Глава 3)

1. **Кольер, Р.** Оптическая голография / К. Беркхарт, Л. Лин // М.: Мир, 1973. – 686 с.
2. **Демтрёдер В.** Лазерная спектроскопия: Основные принципы и техника эксперимента // М.: Наука, 1985. – 304 с.
3. **Матвеев А.Н.** Оптика // М.: Высшая школа, 1985. – 351 с.
4. **Dong, L.** Ultraviolet absorption in modified chemical vapor deposition performs / L. Dong, J. Pinkstone, P. St. J. Russell, D. N. Payne // J. Opt. Soc. Am. B. – 1994. – V. 11. – № 10. – P. 2106-2111.
5. **Lemaire, P. J.** High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres / P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi, W. A. Reed // Electronics Letters. – 1993. – V. 29. – № 13. – P. 1191-1193.
6. **Алейник, А. С.** Подстройка центральной длины волны источника оптического излучения в интерферометрических датчиках на основе волоконных брэгговских решеток / А. С. Алейник, А. Ю. Киреев, М. В. Мехреньгин, М. А. Чиргин, М. Н. Беликин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 5. – С. 809-816.
7. **Ефимов, М. Е.** Исследование характеристик направленности сдвоенного волоконно-оптического гидрофона / М. Е. Ефимов, М. Ю. Плотников, М. В. Мехреньгин, В. С. Лавров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 6. – С. 1015-1020.
8. **Ефимов, М. Е.** Моделирование и экспериментальное исследование чувствительного элемента волоконно-оптического гидрофона / М. Е. Ефимов, М. Ю. Плотников, А. В. Куликов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – Т. 93. – № 5. – С. 158-163.

Список сокращений

ВБР	волоконная брэгговская решетка
ОВ	оптическое волокно
УФ	ультрафиолетовый
ВВО	β -борат бария
ЗГ	задающий генератор
УМ	усилитель мощности
ИФП	интерферометр Фабри-Перо
СД	светоделитель
<i>М</i>	зеркало
ЦЛ	цилиндрическая линза
ФМ	фазовая маска
ПК	персональный компьютер

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА СВЕТОВОДНОЙ ФОТОНИКИ

Кафедра световодной фотоники (раннее кафедра физики и техники оптической связи) вошла в состав инженерно-физического факультета в 1976 г. И в 2010 году была переведена на вновь созданный факультет инфокоммуникационных технологий. Заведующим кафедрой является д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ И.К. Мешковский. На кафедре развились два научно-технических направления: технология оптического волокна и создание новых композиционных оптических материалов. В 1982 году кафедра первой в стране стала осуществлять подготовку инженеров по специальности «Волоконная и интегральная оптика». На базе кафедры были проведены первые в России разработки по технологии производства оптического волокна, оптических жгутов, различных волоконно-оптических приборов и систем. Возникла научная школа в области фотоники дисперсных и нелинейных сред. В 1998 году в связи с развитием систем телекоммуникации и высокими потребностями в специалистах по волоконно-оптической связи кафедра первой в Санкт-Петербурге стала осуществлять подготовку инженеров по специальности «Физика и техника оптической связи». С 2008 года – подготовку бакалавров и магистров по направлению «Телекоммуникации», а с 2011 года – подготовку бакалавров и магистров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Кафедра осуществляет научные разработки совместно со многими зарубежными фирмами и университетами.

Грибаев Алексей Иванович, Варжель Сергей Владимирович,
Куликов Андрей Владимирович

Интерферометрические методы записи волоконных решеток Брэгга

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49