

**ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу
АБДУЛЛИНОЙ СОФЬИ РАФИСОВНЫ
«**Подавление боковых резонансов в спектре волоконных брэгговских
решеток, записанных гауссовым пучком в голографических схемах**»,

представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика

На оппонирование представлены:

- диссертация на 128 страницах;
- автореферат диссертации, объемом 1 п.л.;
- 13 печатных работ, их которых шесть являются публикациями в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, девять представлены в базе данных цитирования Scopus и восемь – в базе данных цитирования WoS.

Актуальность темы

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) как базовые элементы, определяющие основные характеристики телекоммуникационных и сенсорных систем, систем генерации лазерного излучения, как для метрологических, так и технологических приложений, привлекают к себе интерес исследователей на протяжении четверти века. Результат деятельности последних – постоянное совершенствование технологий записи ВБР, обеспечение различных типов их спектральных характеристик, а также расширение множества их применений, свидетельством чего, например, является ряд оригинальных приложений решеток в системах радиофотоники.

Несмотря на это, применение ВБР связано с рядом проблем, к которым следует отнести мультипликативность их отклика на воздействие различных физических полей, наличие с одной стороны осцилляций, а с другой монотонности спектральной характеристики в области центральной длины волны, и, наконец, наличие боковых резонансов, критичных в той или иной степени для всех указанных выше типов систем, использующих в своей структуре уникальные свойства ВБР.

Казалось бы, решение последней задачи известно уже в течение 20 лет. Для частичного или полного подавления боковых резонансов применяется аподизация решеток, под которой подразумевается плавное изменение амплитуды модуляции наведенного показателя преломления по ее длине: применение гауссова профиля огибающей – для подавления с длинноволновой стороны, а ее формирование с постоянным средним значением – с коротковолновой. Однако, указанные, достаточно противоречивые требования, не всегда можно реализовать, либо такая реализация будет очень сложной, многоступенчатой, во многом зависящей, как от длины решетки, так и от характеристик применяемого для записи оборудования, в частности, лазеров, и, собственно, методов записи, как правило, применяющих технологии сканирования.

Значительным образом два последних фактора, характеристики лазерного излучения и технологичность методов, могут проявляться при записи ВБР для лазерных схем генерации, к которым предъявляются повышенные требования по равномерности спектральных характеристик и уровню боковых резонансов. Однако вопрос их комплексного влияния на характеристики синтезируемых ВБР незначительно освещен в современных исследованиях и сохраняет свою актуальность при повышении требований к параметрам излучения волоконных лазеров.

Следовательно, диссертация Абдуллиной С.Р. является востребованной, а задача исследования и разработки технологичных интерферометриче-

ских методов и средств записи, обеспечивающих подавление боковых резонансов в спектре отражения ВБР без использования сканирования (в полном поле интерференционной картины, получаемой при пропускании гауссова пучка через фазовую маску или интерферометр Ллойда), в свете комплексного определения возможных условий, при которых управление параметрами средств записи и последовательностью процессов для ее реализации может быть использовано для улучшения характеристик решеток, является своевременно поставленной. Тема диссертации, цель и задачи, на достижение и решение которых она направлена, актуальны, а полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью.

Новизна полученных результатов, степень их обоснованности и достоверности

При анализе **научной новизны** полученных результатов следует выделить методы, разработанные для выравнивания среднего значения наведенного показателя преломления, обеспечивающие подавление боковых резонансов в коротковолновой части спектра высокоотражающих ВБР в пределах 20 дБ.

1) Отличительной особенностью первого метода является дополнительная засветка записанной интерференционной структуры непромодулированным гауссовым пучком слева и справа от нее на расстоянии порядка радиуса записывающего пучка. Показано, что при отклонениях от строго симметричного варианта засветки ширина основного резонанса несколько увеличивается, но остается сравнимой с шириной резонанса без засветки.

2) Второй метод характеризуется формированием относительного сдвига центров интерферирующих гауссовых пучков +1-го и -1-го порядка фазовой маски при ее поперечном смещении в направлении от волокна. Отмечен эффект выравнивания среднего значения наведенного показателя пре-

ломления при возрастании расстояния между центрами интерферирующих пучков.

3) Основой третьего метода при записи ВБР в области интерференции двух частей гауссова пучка в интерферометре Ллойда является смещение зон падающего гауссова пучка относительно оси деления интерферометра. Данный метод позволяет записывать решетки со сглаженным спектром отражения в широком диапазоне рабочих длин волн (брэгговская длина волны изменяется за счет изменения угла падения пучка) без существенного влияния процедуры сглаживания на ширину спектра ВБР.

Особо следует выделить следующий результат: разработка указанных методов стала возможной лишь после создания источников когерентного непрерывного ультрафиолетового (УФ) излучения (длина волны генерации 244 нм), использующих удвоение частоты аргонового лазера в кристалле ВВО, помещенном в базовый или внешний резонаторы лазера. В первом случае мощность УФ излучения достигала 1 Вт, что в два раза превышало мощность известных ко времени выполнения работы УФ источников, работающих на длине волны 244 нм. Увеличение мощности достигнуто за счет увеличения апертуры основного пучка в разрядной трубке. Длина когерентности составила ≥ 3 см, что достаточно для записи ВБР интерференционными методами. Во втором случае при обеспечении оптимального согласования моды лазера с собственной модой внешнего резонатора и соблюдении условий синхронизма отмечены следующие параметры УФ излучения: максимальная мощность второй гармоники ~ 30 мВт, что достаточно для «мягких» режимов записи ВБР интерференционными методами, а длина когерентности излучения ~ 10 м, что создает основу для создания различных методов записи ВБР на «удаленном» волокне. Автором в диссертации для отработки методов уменьшения уровня боковых резонансов использовался первый вариант с более предпочтительными энергетическими характеристиками и скоростью записи ВБР.

Остановлюсь более подробно на методах и подходах, использованных автором для получения указанных результатов, и обеспечивающих **достоверность и обоснованность** последних.

В первую очередь, автором был произведен подробный анализ публикаций, рассматривающих вопросы применения ВБР, технологий определения их характеристик, методов и средств записи. Исходя из этого анализа, было выявлено, что существует множество профилей показателя преломления, формируемых непрерывным УФ или фемтосекундным (с разной длиной волны) излучением, которые позволяют получить спектр ВБР с подавленными боковыми резонансами, при этом практическая реализация большинства из них требует технологически сложных сканирующих методик. Кроме того было показано, что основные характеристики ВБР зависят и от параметров записывающего лазерного излучения, которые в случае УФ лазера, поддаются более простому мониторингу и управлению, при чем как по энергетическим так и по пространственным параметрам.

На основании данных выводов для исследований и оптимизации был выбран УФ лазер с получением второй гармоники на кристалле ВВО, расположенном в базовом или внешнем резонаторе. На основе классических представлений рассмотрены распространение обыкновенной и необыкновенной волн и обеспечение синхронизма в одноосном кристалле, параметры оптимальной фокусировки гауссова пучка в нем, согласование моды лазера с собственной модой внешнего резонатора, ее характеристики при использовании базового резонатора. Для расчета резонаторов использовался метод ABCD-матриц. Полученные решения о необходимости увеличения апертуры основного пучка в разрядной трубке основаны на известных постулатах физики лазеров.

Таким образом, используемые в работе вычислительные модели генерации лазерного УФ излучения с требуемыми для записи ВБР параметрами основываются на применении хорошо известного математического аппарата

матриц и классической физики лазеров, а результаты моделирования подтверждены экспериментально при вариациях ряда параметров схемы.

Методологическое обоснование предложенных решений для выравнивания среднего значения наведенного показателя преломления, обеспечивающих подавление боковых резонансов в коротковолновой части спектра высокоотражающих ВБР в пределах 20 дБ основано на применении моделей наведенного показателя преломления с учетом параметров записывающего излучения. Необходимо отметить, что результаты имитационного моделирования методов, полученные в работе, подтверждены экспериментально. Ряд отличительных моментов объяснен с точки зрения теории интерференции, что позволило выявить дополнительные преимущества разработанных методов.

Значимость результатов для науки и практики

Схемотехнические решения источников записывающего излучения, рассмотренные в работе, являются развитием идеи хорошо зарекомендовавших себя на практике аргоновых лазеров с преобразованием частоты, и поэтому могут быть использованы при создании станций записи ВБР, для которых особо востребованы импортозамещающие технологии, позволяющие снизить стоимость оборудования.

Предложенные в работе методы повышения качества записи ВБР, в общем случае, не содержат в своей структуре сложных сканирующих элементов, и поэтому могут широко применяться на практике. Для осуществления перемещения масок, формирования засветки, получения осевого сдвига лазерного пучка могут использоваться устройства или приспособления, доступные на рынке. При этом сами методы могут быть использованы как для записи достаточно широкополосных высокоотражающих ВБР, так и для записи узкополосных решеток для сенсорных применений, в том числе, со специальной формой спектра.

Результаты исследования внутренних процессов формирования записывающих излучений в УФ лазере с требуемыми параметрами, их реальное отражение в характеристиках профиля наведенного показателя преломления в оптическом волокне и, как следствие, в спектральных характеристиках ВБР с заданным уровнем подавления боковых резонансов имеют существенное значение для сферы моделирования указанных процессов при решении, как частных задач, так и комплексного анализа. В работе показано, что при расчете ожидаемых показателей качества записи ВБР необходимо комплексно учитывать энергетические и пространственные характеристики лазерного излучения, особенности формирования интерференционной картины при его определенной длине когерентности, а получение выигрыша по уровню подавления боковых резонансов может быть достигнуто методологически при использовании незначительного рассогласования оптических схем, что в отличие от общепринятых представлений, определено автором как положительный фактор.

Оценка диссертации по ее завершенности, стилю и языку изложения

Диссертационная работа Абдуллиной С.Р. представляет собой законченное научное исследование, содержащее решение актуальной научно-технической задачи. Ее содержание изложено последовательно, методически правильно, с использованием, в основном, общеупотребительных терминов и полностью раскрывает сформулированные и решаемые научные и практические задачи.

Работа написана грамотно, хорошим языком, стилистические ошибки и опечатки встречаются сравнительно редко. Диссертация содержит богатый иллюстрирующий материал в виде большого числа рисунков и графиков. Основные цитируемые положения сопровождаются ссылками на источники.

В целом диссертация по объему и оформлению соответствует требованиям ВАК России. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации и в достаточной мере раскрывает ее содержание.

Апробация и публикация результатов работы

Научные и практические результаты работы полностью опубликованы в 13 печатных трудах: шесть статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, и входящих в базу данных Scopus, а пять из них и в базу данных Web of Science; три статьи в рецензируемых и реферируемых трудах международного научно-технического общества SPIE, входящих в базу данных Scopus и Web of Science; четыре публикации тезисов докладов международных и всероссийских конференций. Результаты неоднократно докладывались и обсуждались на научно-технических симпозиумах и конференциях различного ранга. Из выше изложенного следует, что апробация работы вполне достаточна.

Замечания по диссертационной работе

По содержательной части:

1) Хотелось бы понять почему в название диссертации вынесены «голографические» схемы записи, а в заключении, да и практически во всей работе, используется только термин «интерференционные». Насколько можно считать эти термины синонимами, какова грань различия между ними?

2) Требуется пояснения значение «– 20 дБ» ключевого параметра подавления уровня боковых резонансов, проходящее через всю диссертацию как целевая функция. Не понятно, почему выбрано это значение, ни меньше и ни больше, какими требованиями оно обусловлено. В ряде положений диссертации дается объяснение, что уровень боковых резонансов определяет порог

чувствительности аппаратуры в сенсорных применениях, но так ли это важно в ВБР для схем генерации лазерного излучения? Нельзя ли привести классификацию требований к ВБР для различных приложений по данному параметру и сравнение достигнутых автором результатов с существующими.

3) В работе не представлены фотографии экспериментальных установок, что существенно подняло бы ее уровень при оценке достоверности полученных результатов (хотя оппонент не сомневается в их наличии). Также мало внимания уделено метрологическому обеспечению исследований, хотя в постановке задач (задача 2) на это сделан особый акцент. Например, непонятна методика эксперимента по снятию профиля гауссова пучка (стр. 62), к чему в фотоприемнике привязано его положение, выраженное в миллиметрах, какова площадь чувствительной области фотоприемника, каково пространственное разрешение измерений и их погрешность.

Следует обратить внимание на ряд структурных замечаний:

- не понятен завышенный объем введения (около 30 стр.), носящий характер обзорной главы;

- в свою очередь обзорная глава очень мала (10 стр.), хотя на ее основе делаются постановки задач дальнейших исследований.

Несомненно, требует ответа существенный вопрос об отсутствии патентной защиты методов, предложенных и использованных в диссертации.

Тем не менее, указанные замечания не снижают научной и практической ценности представленной оппоненту диссертационной работы, которая заслуживает положительной оценки.

Заключение

Диссертационная работа Абдуллиной С.Р., представленная к защите, актуальна, полученные результаты достоверны и обоснованы, обладают научной новизной и практической значимостью, представлены публикация-

