

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Абдуллиной Софьи Рафисовны «Подавление боковых резонансов в спектре волоконных брэгговских решёток, записанных гауссовым пучком в голографических схемах», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика»

В настоящее время одними из ключевых элементов в различных устройствах волоконной оптики являются волоконные брэгговские решетки (ВБР). Это обусловлено, главным образом, их уникальными спектральными свойствами, полностью волоконным исполнением и малыми вносимыми потерями. Ряд важных применений ВБР нашли в волоконных лазерах, где решётка может исполнять роль внешнего зеркала резонатора. Другой не менее важной областью применения ВБР являются волоконно-оптические линии связи. В современных телекоммуникационных системах со спектральным уплотнением каналов решётки могут использоваться как оптические частотные мультиплексоры или как компенсаторы накопленной дисперсии в оптической области. Известно, что брэгговская длина волны зависит от температуры и натяжения волокна. Для телекоммуникационных систем связи такая нестабильность параметров решёток нежелательна и должна контролироваться. Однако этот эффект нашёл очень интересное применение в пассивных волоконно-оптических датчиках, где по изменению длины волны отражённого сигнала можно судить о температуре или величине приложенной нагрузки. В связи с широкой областью применений ВБР, улучшение их спектральных характеристик является важной и актуальной задачей. Диссертационная работа С.Р. Абдуллиной посвящена разработке методов подавления нежелательных боковых резонансов в спектре ВБР, поэтому *актуальность и практическая важность* темы не вызывает сомнений.

Диссертационная работа общим объёмом 128 страниц состоит из введения, трёх глав, заключения, списка обозначений и списка литературы из 110 наименований.

Во введении подробно описаны физические принципы функционирования волоконных брэгговских решёток, методы их изготовления и область возможного применения. Обоснована актуальность работы, представлен литературный обзор по известным методам подавления боковых резонансов в спектре отражения ВБР, сформулирована цель и решаемые в работе задачи, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 приведён обзор теоретических и практических методов исследования ВБР, используемых автором в своей работе. Представлены аналитические оценки наведённого показателя преломления для нескольких решёток определённого типа. Описывается методика численного моделирования спектров отражения ВБР, записанных гауссовым пучком, с помощью которой выявлены зависимости формы спектра отражения решёток от радиуса пучка и величины засветки. Представлены реализованные в работе голографические схемы записи ВБР с использованием фазовой маски и интерферометра Ллойда и описаны их свойства. В завершении кратко описана техника регистрации спектральных характеристик изготовленных ВБР.

Глава 2 посвящена экспериментальному исследованию и оптимизации параметров ультрафиолетового (УФ) лазера, необходимого для голографических схем записи ВБР. В начале главы сформулированы характеристики УФ излучения, определяющие выбор его источника. Делается вывод, что излучение с подходящими характеристиками можно получить при удвоении частоты аргонового лазера в нелинейном кристалле, помещённом во внешний резонатор, или при внутррезонаторном удвоении частоты лазера.

Для первого варианта выполнен расчёт параметров кристалла, необходимых для создания экспериментальной установки. Описан выбор оптимальной фокусировки гауссова пучка в кристалле и представлен расчет конфигурации внешнего резонатора методом ABCD-матриц. Описан механизм согласования моды лазера с собственной модой резонатора. Приведена аналитическая оценка мощности генерации второй гармоники, зависящая от параметров кристалла и излучения. Выполнен физический эксперимент и получены зависимости мощности второй гармоники от мощности основного излучения, показывающие хорошее согласие с теоретическими расчётами. В итоге с помощью схемы с внешним резонатором удалось получить генерацию УФ излучения с длиной волны 244 нм и максимальной мощностью второй гармоники 30 мВт.

Для увеличения мощности УФ излучения было реализовано внутррезонаторное удвоение частоты лазера в нелинейном кристалле. Расчет конфигурации резонатора также выполнен методом ABCD-матриц. С помощью физического эксперимента получены зависимости мощности второй гармоники от мощности основного излучения. В итоге без учёта потерь условная эффективность генерации второй гармоники составила 30%, а её мощность – 1.5 Вт. С учётом потерь мощность составила примерно 0.9 Вт. Показано, что увеличение эффективности генерации второй гармоники обусловлено увеличением сечения пучка основного излучения и использованием широкоапертурной газоразрядной трубки.

Стоит отметить, что два представленных варианта УФ лазера с длиной волны 244 нм, оптимизированных для записи ВБР, были разработаны и реализованы *впервые* к моменту выполнения соискателем своего исследования.

В главе 3 автор переходит к описанию результатов основного этапа своей работы: записи волоконных брэгговских решёток с подавлением боковых резонансов в спектре их отражения. Представлено три различных метода записи, каждый из которых исследован экспериментально и с помощью численного моделирования.

Первый метод подавления боковых резонансов в спектре ВБР заключается в применении дополнительной засветки записанной структуры при схеме записи с фазовой маской. Представлена аналитическая формула для наведённого показателя преломления с учётом дозасветки, с помощью которой методами численного моделирования установлены зависимости спектра отражения от параметров дозасветки. Отмечено, что равная дозасветка слева и справа на одинаковом расстоянии от записанной ВБР, примерно равном радиусу пучка, обеспечивает наиболее гладкий и узкий спектр. Результаты численного моделирования и экспериментов, показывающие хорошее согласие, подтверждают, что предложенный метод позволяет получить спектр высокоотражающей решётки с подавлением боковых резонансов

до уровня -20 дБ. В качестве недостатка метода указана необходимость дважды осуществлять дополнительную операцию засветки, что увеличивает время записи решётки.

Альтернативным методом подавления боковых резонансов в спектре ВБР в схеме записи с фазовой маской является применение поперечного смещения фазовой маски от волокна. Представлен вывод формулы для наведённого показателя преломления с учётом сдвига фазовой маски и методами численного моделирования установлены зависимости спектра отражения от величины сдвига. Однако полученное значительное отличие экспериментальных и теоретических результатов подтолкнуло автора к проведению дополнительных исследований, что привело к уточнению используемой математической модели. Оказалось, что моделирование с учётом уменьшения степени когерентности интерферирующих пучков на периферии даёт лучшее согласие с экспериментом, чем моделирование в предположении полностью когерентных пучков. Данный результат подчёркивает *теоретическую значимость* диссертационной работы. Предложенный метод лишён недостатков предыдущего подхода и позволяет за один этап записывать решётки с большим коэффициентом отражения и подавленными боковыми резонансами.

Третий метод подавления боковых резонансов в спектре ВБР предложен для схемы записи с интерферометром Ллойда и заключается в смещении оси деления пучка в интерферометре. Методами численного моделирования установлены зависимости спектра отражения от величины смещения оси деления пучка и с учётом уменьшения степени когерентности на периферии пучка. Полученные экспериментальные спектры показывают качественное согласие с расчётными спектрами.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

По содержанию и оформлению работы имеются следующие замечания:

1. При чтении бумажного варианта диссертации обнаружилось, что после стр. 47 следует точно такая же страница, как по номеру, так и по содержанию, а стр. 80 располагается между стр. 76 и 77 и отсутствует между стр. 79 и 81. В диссертации некоторые рисунки встречаются раньше их упоминания в тексте, что затрудняет чтение работы.

2. В тексте диссертации встречаются опечатки и неудачные формулировки. Так, на стр. 25 написано: «...были созданы лазеры, генерирующие на длинах волн 1.064 нм [64]...». Если обратиться к источнику, на который стоит ссылка, то можно обнаружить, что авторы продемонстрировали лазер, генерирующий на длине волны 1073 нм. На стр. 54 перепутаны метры и миллиметры. Регулярно встречаются единицы измерения, написанные на английском языке (например, стр. 49, 54 и др.). На стр. 60 неудачно написано: «Максимальная мощность генерации второй гармоники с учётом потерь на выходном зеркале и брюстеровской поверхности кристалла – 1.5 Вт». Это выражение вводит в заблуждение, хотя возможно и является устоявшимся среди специалистов по лазерной физике. Учёт дополнительных потерь подразумевает уменьшение исследуемой величины. Максимальная мощность генерации второй гармоники с учётом потерь составляет 0.9 Вт, как показано на рис.2.6, а 1.5 Вт – это мощность генерации второй гармоники без учёта потерь.

3. На стр. 38 отмечено, что «с увеличением параметра s увеличивается амплитуда и ширина основного пика и боковых резонансов, а их положение практически не меняется...». Не понятно, на основе чего сделан такой вывод, так как все предшествующие расчёты выполнены при одном и том же значении параметра s (видность интерференционной картины). Если вывод сделан на основе анализа теоретической оценки зависимости спектра от параметра s , то нужно привести соответствующие выкладки, а если на основе численных расчётов или эксперимента, то нужен дополнительный рисунок.

Чтобы подчеркнуть *практическую значимость* работы, стоит отметить, что изготовленные соискателем брэгговские решётки с подавленными боковыми резонансами уже использовались при проведении научно-исследовательских работ, а результаты этих исследований опубликованы в известных научных журналах по тематике диссертации.

Сильной стороной диссертации является постоянное сравнение результатов физического эксперимента с результатами численного моделирования и аналитическими оценками. Совпадение результатов исследований при использовании различных подходов подтверждает *достоверность выводов и рекомендаций*, сформулированных в диссертации.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку представленной работы. Диссертация С.Р. Абдуллиной представляет собой цельное и законченное научное исследование, в котором содержится решение важных и актуальных задач повышения качества записи волоконных брэгговских решёток. Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы, обладают научной новизной и представляют как практическую, так и теоретическую ценность. Результаты работы опубликованы в шести научных статьях в журналах, рекомендованных ВАК, а также представлены на всероссийских и международных конференциях и семинарах. Автореферат диссертации адекватно отражает её содержание.

Таким образом, считаю, что диссертационная работа С.Р. Абдуллиной «Подавление боковых резонансов в спектре волоконных брэгговских решёток, записанных гауссовым пучком в голографических схемах» является завершённой научно-квалификационной работой и полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.05 – «Оптика», а сам соискатель заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент
научный сотрудник лаборатории
вычислительных технологий ИВТ СО РАН
к.ф.-м.н.

Подпись А.А. Редюка заверяю:
Учёный секретарь ИВТ СО РАН
к.ф.-м.н.

А.А. Редюк

30.09.2014



Д.В. Есипов

30.09.2014