

Отзыв

оппонента Протасова Е.А. на диссертацию Шайдуллина Р.И. «Радиочастотная импедансная спектроскопия активных оптических волокон при усилении лазерного излучения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика

Диссертация Шайдуллина Р.И. посвящена разработке метода радиочастотной импедансной спектроскопии для измерения распределения температуры в активных световодах при усилении мощного лазерного излучения, а также исследованию свойств диэлектрических структур, используемых в волоконных лазерах при воздействии на них температурных полей.

Тщательные исследования факторов, ограничивающих рост мощности лазеров, позволили установить, что величина этой мощности сильно зависит от термических свойств полимерного покрытия световода и его геометрии. При разогреве волокна возрастает порог генерации, изменяется модовый состав излучения, ухудшается качество выходного пучка. Высокая температура разогрева может привести к разрушению оптического волокна. Из сказанного выше ясно, что генерация тепла в волоконном лазере является главным физическим процессом, определяющим энергетические и спектральные характеристики лазеров. Отсюда следует, что контроль температуры волокна и ее минимизация становится важнейшим направлением научно-технического совершенствования волоконных лазеров.

В этом плане, развитый в диссертационной работе метод радиочастотной импедансной спектроскопии, позволяющий проводить бесконтактные измерения продольного и поперечного распределения температуры активного световода в условиях усиления мощного лазерного излучения, дает возможность определить основные механизмы разогрева волокна и численно оценить их вклад в общий разогрев. В этом проявляется **актуальность и значимость** диссертационной работы, а ее **практическая направленность** не вызывает никаких сомнений.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключения и списка цитированной литературы.

Во **Введении** представлена общая картина состояния физики и технического использования волоконных лазеров; существующие проблемы, связанные с причинами, ограничивающими мощность волоконных лазерных систем; сформулированы цели и задачи диссертационной работы, определены научная новизна и практическая значимость работы, а также основные научные положения, выносимые на защиту, которые сформулированы достаточно четко и понятно. Здесь же указаны публикации и научные доклады автора на различных конференциях. Следует отметить, что работы диссертанта хорошо представлены – опубликованы в ведущих отечественных и иностранных научных журналах.

В **главе 1** дается весьма подробный обзор литературы в исследуемой области, описаны существующие теоретические и экспериментальные методы изучения тепловых эффектов в активных оптических волокнах.

К настоящему времени имеется весьма значительное число теоретических работ по исследованию тепловых эффектов, в которых приводятся расчеты пространственного распределения температуры в волокне, как в стационарном, так и импульсных режимах. В большинстве теоретических работах за основу выбиралась модель разогрева, в которой единственным механизмом возрастания температуры волокна был разогрев из-за разности (размена) энергий квантов накачки и генерации в активной сердцевине. Что касается экспериментальных исследований, то основная цель этих исследований сводилась к выяснению влияния разогрева на характеристики волоконного лазера. Справедливости ради, следует отметить, что совсем недавно (в 2010 – 2012 г.г.) было предложено и реализовано несколько способов измерений температуры сердцевины волокна в т.ч. и с помощью тепловизора с высоким разрешением. Но такой метод измерения требует прямой доступ к открытому волокну без дополнительного покрытия. Тем не менее, большинство методов предполагают контактный способ измерения с последующим расчетом температурного профиля волокна.

В этой же главе приводится описание метода радиочастотной импедансной спектроскопии и его применение для исследования диэлектрических материалов. Как правило, измерительный узел представляет собой конденсатор, в который помещается исследуемый диэлектрик. При этом функция импеданса цепи от частоты зависит от диэлектрической проницаемости диэлектрика, которая, в свою очередь сильно зависит от температуры. Чувствительность к изменению диэлектрических свойств исследуемого объекта в радиочастотном диапазоне существенно повышается, если использовать резонансную схему. Подобная принципиальная схема легла в основу измерений зависимости диэлектрической проницаемости от температуры материалов, используемых в оптическом волокне.

Естественно, что для понимания механизмов воздействия температуры на оптические, термические и механические свойства различных типов полимеров, используемых в волоконных лазерах, диссертант подробно описывает свойства различных полимеров. Среди них в волоконной оптике большое распространение получили полисилоксаны, поскольку они химически инертны, водостойки и фотостабильны, имеют высокую тепловую стабильность и обладают хорошими механическими свойствами. Однако у таких полимеров имеются пики поглощения в ИК-области спектра, которые могут попадать в диапазон рабочих длин волн лазеров и диодов накачки и, тем самым, создавать дополнительный разогрев. Автор диссертации проанализировал такую возможность и провел соответствующие экспериментальные исследования, результаты которых изложены в 3-й главе.

В **главе 2** описывается способ измерения разогрева активной сердцевины волоконного световода с помощью интерферометра Маха-Цандера, в котором интерференционная картина возникала из-за сдвига фазы между двумя разделенными лучами, один из которых (тестовое плечо) проходил через

исследуемый волоконный лазер. Разогрев тестового плеча за счет тепловыделения в процессе генерации излучения в сердцевине оптического волокна приводил к изменению оптической разности хода между плечами. На созданном автором экспериментальном стенде были проведены измерения для двух вариантов Yb лазеров, в одном из которых волоконный лазер был залит слоем защитного полимера, а другой лазер выполнен в виде кольца из волокна, покрытого только обычной тонкой полимерной оболочкой, находящегося на воздухе. Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что наличие толстого слоя полимера существенно усиливает разогрев активного волокна. Кроме того, на волоконном блоке, залитом полимером был впервые обнаружен нелинейный эффект – резкое уменьшение наклона зависимости температуры разогрева от поглощаемой мощности накачки при достижении порога генерации лазерного излучения. Для волокна без дополнительного полимера такого эффекта не наблюдалось.

К сожалению, автор указал лишь длину волокна одного лазера, поэтому вывод о причине такого поведения сделать затруднительно. Кроме того, утверждение на (с.56) что это происходит “из-за того, что спектр спонтанной люминесценции иттербиевого лазера более коротковолновый, чем длина волны генерации, а значит и меньшая энергия размена квантов накачки и генерации выделяется в виде тепла”. Но из текста не следует, что лазеры были разными, поэтому данное утверждение должно относиться к обоим лазерам.

Подобные измерения автором были выполнены и на Yb/Er волоконном лазере. В этом лазере разница энергий квантов накачки и генерации в 4 раза больше, чем в Yb лазере, следовательно, тепловые эффекты в Yb/Er лазере должны быть намного больше. Проведенные измерения этот вывод подтвердили. Коэффициенты разогрева для Yb/Er волокна и Yb волокна отличаются менее чем в два раза, хотя разница энергий квантов накачки и генерации, как указывалось выше, в 4 раза. После несложных оценок автор приходит к заключению, что этот факт связан с различной длиной активного волокна (в одном случае 3 метра для Yb лазера, а в другом случае 7 метров для Yb/Er лазера).

Однако, не очень понятно, почему не удалось провести исследования на лазерах с одинаковой длиной волокна, тем более, что сам автор приходит к выводу, что от длины волокна параметры лазерного излучения могут сильно зависеть.

Тем не менее, главным недостатком данного метода автор справедливо считает усреднение температуры разогрева по длине волокна, в то время как для критической работы лазера является не усредненная, а максимальная температура на каком-либо локальном участке, например в месте сварки волокна. Кроме того, интерференционный метод измерения разогрева активной сердцевины волокна является очень чувствительным к флуктуациям температуры и давления. Особенно этот метод чувствителен к вибрациям, из-за чего его трудно реализовать даже в лабораторных условиях.

Несоответствие реального разогрева с теоретическими моделями привела автора к созданию коаксиальной модели разогрева, в которой излучение накачки; спонтанная фотолюминесценция; лазерное излучение, рассеянное на

дефектах и неоднородностях до достижения порога генерации, могут активно поглощаться полимерным слоем и приводить к разогреву волокна.

В главе 3 диссертации представлены результаты исследований оптических спектров поглощения в ближнем ИК-диапазоне конкретных полисилоксановых полимеров, используемых для покрытия волокон в коммерческих волоконных лазерах. Необходимо отметить, что подобные исследования были выполнены впервые. В результате удалось установить, что характерные пики поглощения присутствуют во всех исследованных полимерах, что говорит о наличии общей для них атомной группы, ответственной за эти пики поглощения. Кроме того, самые сильные пики поглощения (890-940 нм и 1000-1060 нм) попадают в спектральный диапазон длин волн излучения накачки и фотолюминесценции мощных иттербиевых волоконных лазеров, что и является главной причиной различного поведения зависимости температуры разогрева от поглощаемой мощности накачки.

Таким образом, предложенная автором коаксиальная модель разогрева позволила объяснить наблюдаемые особенности разогрева при наличии толстого слоя полимера и без него. Кроме того, наличие пиков поглощения не только в исследованных полисилоксановых образцах, но и в большинстве органических полимерах позволило автору сделать вывод о том, что устранить подобный эффект невозможно и это необходимо учитывать при разработке волоконно-оптических лазерных систем.

В главе 4 представлены исследования распределения температуры в полимерной оболочке активного световода с помощью метода радиочастотной импедансной спектроскопии.

Этот метод был предложен и реализован автором диссертации для решения задачи измерения температуры непосредственно в полимерной оболочке световода.

Для экспериментальных исследований была создана автоматизированная установка, в которой измерялась резонансная частота в LC-контуре, образованном оптическим волокном, помещенном между обкладками двухпроводного конденсатора. Для этой установки были разработаны способы калибровки и измерения температуры оптических волокон в условиях усиления мощного лазерного излучения. При калибровке установки было определено, что радиочастотная диэлектрическая проницаемость плавленого кварцевого стекла не зависит от температуры, в то время как полимерное покрытие испытывает достаточно сильную температурную зависимость. Это позволило, измеряя изменение диэлектрической проницаемости оптического волокна при его разогреве, определять температуру полимерной оболочки волокна. Так, при 120 Вт накачки и 100 Вт выходной оптической мощности усилителя Yb лазера температура разогрева полимера на самом разогретом участке достигала 40 К, в то время как на наименее разогретом участке всего 6 К.

Исследования пассивных потерь излучения накачки с нелегированным волокном показали, что мощное излучение накачки той же мощности, даже без преобразования его в активной среде, приводит к разогреву полимерной оболочки на 8 градусов.

Интересный и важный эксперимент был выполнен при замене оптической кварцевой сердцевины сердцевиной металлической, на которую был нанесен слой полимера. С помощью такого оригинального эксперимента автору удалось определить долю всех механизмов преобразования оптического излучения в тепло. Эти данные получены впервые и могут представлять большую ценность при теоретических расчетах характеристик мощных волоконно - оптических лазеров.

Кроме того, на данной установке были выполнены оригинальные эксперименты по выяснению роли конвективного теплообмена полимерной оболочки с окружающей средой, поскольку промышленные волоконные лазеры работают в таких условиях. Автору удалось обнаружить, что тепловое охлаждение сопровождается двумя процессами – быстрым охлаждением металлической сердцевины (90% общего разогрева) и медленным охлаждением всего конденсаторного блока (10% общего разогрева). С учетом влияния внешней среды была оценена температура разогрева самого разогретого участка волокна, которая с довольно хорошей точностью совпала с измеренной ранее.

В главе 5 проведено математическое моделирование распределения электрического поля и температуры в конденсаторе с неоднородным диэлектрическим заполнением. Здесь можно отметить следующие новые значимые достижения автора диссертации. Используя программный пакет COMSOL Multiphysics автор установил, во-первых, что расчет емкости конденсатора с кварцевой серединой и медным проводником дали очень близкие результаты, что позволяет считать идентичность электрических свойств конденсаторов при экспериментах с активным волокном и тонкой медной проволоки, покрытой полимером, а во-вторых, модельный расчет разогрева волокна с учетом поглощения излучения в полимере совпал с результатами экспериментов, в то время как разогрев в модели, учитывающей только обмен энергии квантов оптической накачки и генерации в активной среде оказался заметно ниже. Таким образом, моделирование подтвердило необходимость учета поглощения в полимерной оболочке.

В качестве замечаний следует также отметить:

1. Автор неоднократно приводит абсолютные значения измеренных температур разогрева, например, 6К, 40К, 53К и т.д. (стр. 98) не указывая, при каких внешних температурах проведены измерения.

2. Наблюдается некоторая небрежность в оформлении диссертации, в первую очередь это касается написания формул (стр.99, 79, 42, 41, 40, 37).

3. Отсутствует критерий “маломодового” лазерного излучения (стр.93).

4. На стр. 71 дается ссылка на рисунок в главе 1, который отсутствует.

5. В автореферате на стр.19 указана глава 6, которая отсутствует в диссертации.

Однако данные замечания носят не принципиальный характер и не меняют общей положительной оценки диссертации, выполненной на высоком научном уровне.

Полученные в диссертации результаты имеют важную научную и практическую ценность.

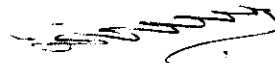
Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждается: совпадением расчетных данных, следующими из модели разогрева полимера волоконно-оптического световода, с экспериментальными данными; публикациями в ведущих научных журналах, а также представлением основных результатов диссертации на международных и всероссийских конференциях.

Диссертационная работа Шайдуллина Р.И. является законченной научно-исследовательской работой в области разработки метода радиочастотной импедансной спектроскопии для измерения термо-оптических свойств активного лазерного волокна в условиях усиления мощного лазерного излучения.

Автореферат диссертации полностью соответствует её содержанию.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (Постановление правительства РФ №842 от 24.09.2013), для кандидатских диссертаций, а ее автор Шайдуллин Ренат Ильгизович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Доктор физ.-мат. наук, профессор



Е.А. Протасов

15 марта 2016 г.

Протасов Евгений Александрович; доктор физ.-мат. наук; Физика конденсированного состояния; Москва 115409, Каширское шоссе, 31. Тел. (499) 324-87-66. <http://www.mephi.ru>; НИЯУ МИФИ; уч.звание – профессор; должность – профессор; кафедра лазерной физики.