

На правах рукописи



Шайдуллин Ренат Ильгизович

**РАДИОЧАСТОТНАЯ ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ АКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ
ВОЛОКОН ПРИ УСИЛЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.03 - Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Фрязино – 2016 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Фрязинский филиал)

Научный руководитель:

Рябушкин Олег Алексеевич,
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Протасов Евгений Александрович,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры лазерной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Дураев Владимир Петрович,
доктор технических наук,
научный консультант Акционерного Общества «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научный центр волоконной оптики Российской академии наук

Защита состоится «8» апреля 2016 г., в 10:00, на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте: <http://cplire.ru/rus/dissertations.html>.

Автореферат разослан “__” _____ 2016 года

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук



Потапов Александр Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Волоконные лазеры и усилители широко применяются во многих областях физики, химии, биологии, телекоммуникаций и медицины. При этом современная обработка материалов в машиностроении и военные технологии требуют все больших мощностей лазерного излучения. Непрерывная мощность оптического излучения современного одномодового волоконного лазера достигает 15 кВт [1]. Лазеры и усилители на основе волоконных световодов позволяют осуществлять наиболее эффективное преобразование оптической многомодовой накачки полупроводниковых диодов в одномодовое излучение волоконного лазера. Классическое оптическое волокно представляет собой составной цилиндрический диэлектрик с несколькими оболочками: сердцевина из плавленного кварца, легированная редкоземельными ионами, световедущая оболочка из плавленного кварца, полимерная оболочка, выполняющая защитную функцию. Технология создания активной среды волоконных лазеров основывается на прецизионном легировании кварцевого стекла ионами редкоземельных элементов (иттербия, эрбия, неодима, тулия и другими). При генерации и усилении лазерного излучения в кварцевой сердцевине оптического световода, легированной редкоземельными ионами, происходит ее разогрев. Объемная плотность мощности поглощаемой оптической накачки в мощных волоконных лазерах и усилителях может превышать 10^6 Вт/см³, при этом часть этой мощности (более 10^5 Вт/см³), обусловленная разницей энергий квантов накачки и генерации, выделяется в виде тепла. Это приводит к тому, что температура разогрева активной среды может достигать сотен градусов. Разогрев активной среды волоконного лазера приводит к изменениям в спектре поглощения и люминесценции активных ионов, уменьшению эффективности лазера, изменению длины волны свободной генерации. Изменения геометрии волокна и диэлектрической проницаемости в оптическом диапазоне при разогреве приводят к изменению модового состава и качества выходного пучка, а также к нестабильности мощности излучения. Высокая температура разогрева может также привести к разрушению оптического волокна. Таким образом, тепловые эффекты в волокне – один из основных факторов, ограничивающих дальнейшее повышение мощности волоконных лазеров и усилителей. Для определения температуры сердцевины волокна в основном пользуются косвенными методами, например, в работе [2] измеряют температуру дополнительного

оптического волокна с брэгговскими решетками, находящегося в тепловом контакте с исследуемым. Изменяя изменение спектра отражения зондирующего излучения в дополнительном волокне (брэгговское отражение), на основе модели теплового контакта рассчитывают разогрев исследуемого световода. Существует теоретическая модель разогрева волокна [3] на основе решения уравнений теплопроводности, в которой единственным источником разогрева является разница энергий между фотонами излучения накачки и лазерной генерации. Оказалось, что этого недостаточно для полной модели разогрева волокна, так как полимерная оболочка может поглощать оптическое излучение и являться источником тепла. В связи с этим необходимо экспериментальное измерение температуры не только сердцевины, но и окружающего световод полимера. Для исследования свойств диэлектрических волоконных структур предлагается использовать метод радиочастотной (РЧ) импедансной спектроскопии. РЧ импедансная спектроскопия широко применяется для исследования изменений электрических свойств аморфных и кристаллических диэлектриков. Ее основой является измерение переменного тока в последовательной электрической цепи с радиочастотным генератором переменного напряжения, конденсатором, между обкладками которого помещен исследуемый диэлектрик, и нагрузочным сопротивлением. Частотная зависимость импеданса электрической цепи определяется диэлектрической проницаемостью исследуемого диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость исследуемого объекта может зависеть не только от частоты, но и от различных внешних и внутренних параметров, таких как температура, влажность, давление. Это позволяет измерять параметры объекта методом импедансной спектроскопии. Чувствительность к изменению диэлектрических свойств исследуемого объекта можно значительно повысить использованием резонансных методов. Диэлектрическая проницаемость плавленого кварца в РЧ диапазоне слабо меняется с повышением температуры, при этом диэлектрическая проницаемость многих типов полимеров в РЧ диапазоне может сильно зависеть от его температуры, что делает их подходящими объектами для исследования методом импедансной спектроскопии. Также полимер обладает намного меньшей тепловой устойчивостью, чем плавленый кварц, поэтому исследование разогрева полимерных оболочек волокон играет важную роль в построении модели разогрева волокна и оценки лимитирующих факторов для повышения мощности излучения волоконных лазеров и усилителей.

Цели и задачи диссертационной работы. Целью данной работы является развитие метода радиочастотной импедансной спектроскопии для исследования диэлектрических свойств различных волоконных диэлектрических структур и измерение продольного и поперечного распределения температуры активного световода в условиях усиления мощного лазерного излучения, а также создание математической модели разогрева оптического волокна, встроенного в двухпроводный конденсатор.

Измерение температуры активного световода методом импедансной спектроскопии включает в себя:

а) разработку автоматизированной экспериментальной установки для измерения резонансной частоты в LC-контуре, в котором оптическое волокно помещается между обкладками двухпроводного конденсатора

б) разработку экспериментальных методик калибровки и измерения температуры оптических волокон в режиме усиления мощного лазерного излучения

в) построение физической модели разогрева активного оптического волокна и нахождение взаимосвязи экспериментально измеряемых изменений резонанса LC-контра со встроенным в него волокном с температурой разогрева световода.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые применен метод радиочастотной импедансной спектроскопии для исследования разогрева активных оптических волокон, легированных редкоземельными ионами, в условиях усиления мощного лазерного излучения, позволяющий определить продольное и поперечное распределение температуры в активных световодах в диапазонах температур 290-370 К и выходной оптической мощности 0-100 Вт.

2. Впервые предложена и разработана модель дополнительного разогрева оптическим излучением полимерной оболочки активного световода в волоконном усилителе.

3. Впервые сравниваются модели разогрева оптического волокна излучением и разогрева медной проволоки с полимерным покрытием электрическим током.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

1. Разработанный экспериментальный стенд позволяет измерять температуру разогрева активных одномодовых и многомодовых оптических

волокон мощных волоконных лазеров и усилителей. Длины измеряемых участков волоконных лазеров и усилителей могут составлять от 0,1 до 10 м. Точность измерения температуры в диапазоне 290-370 К составляет 0,1 К.

2. Из функциональной зависимости температуры оптического световода от мощности лазерного излучения определены основные механизмы разогрева волокна и даны численные оценки их вкладов в общий разогрев.

3. Предложенный метод физического моделирования разогрева оптического волокна на основе металлической проволоки с полимерным покрытием позволяет определить выделяемую в сердцевине тепловую мощность и коэффициент теплообмена волокна с окружающей средой.

Методологической основой данного исследования является радиочастотная и оптическая спектроскопия.

Для исследования температуры разогрева полимерной оболочки волоконного усилителя в условиях усиления лазерного излучения использовалась радиочастотная импедансная спектроскопия. Для определения коэффициентов поглощения излучения полимерными оболочками использовалась оптическая спектроскопия в видимом и инфракрасном диапазонах.

Анализ распределения температуры в волоконных структурах основывается на решении стационарных и нестационарных уравнений теплопроводности. Расчет электрических полей в исследуемых структурах базируется на численном решении уравнений Максвелла.

Положения, выносимые на защиту

1. Изменение действительной части диэлектрической проницаемости в радиочастотном диапазоне волоконных световодов от мощности оптической накачки пропорционально температуре полимерной оболочки активного волокна.

2. Спектральный диапазон оптического поглощения используемых в волоконной оптике полимеров полисилоксановой группы попадает в рабочий диапазон длин волн излучения полупроводниковых лазеров накачки (900-970 нм) и спонтанной фотолюминесценции (1020-1100 нм) волоконных лазеров, легированных ионами Yb^{3+} .

3. Измерение резонансной частоты колебательного LC-контура со встроенным в него оптическим волокном позволяет определять усредненную температуру разогрева активного световода волоконного усилителя.

4. Импедансная спектроскопия оптического волокна позволяет оценить дополнительный разогрев волокна, связанный с поглощением излучения оптической накачки и фотолюминесценции в полимерной оболочке активных кварцевых волокон.

Достоверность результатов исследования обеспечивается анализом использованных экспериментальных методов лазерной и радиофизики, подтверждением предложенных теоретических моделей в экспериментах. В работе применялось экспериментальное и математическое моделирование исследуемых объектов и процессов, подтверждавшие основные выводы исследования. Экспериментальные результаты демонстрируют повторяемость в рамках погрешности и независимость от неконтролируемых параметров.

Апробация результатов: Результаты исследований, изложенные в диссертации, в полной мере отражены в опубликованных **15** печатных работах, в том числе **5** научных статей, из которых **4** статьи - в научных журналах, входящих в Перечень российских рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, **1** статья – в зарубежном научном издании, входящем в систему цитирования Web of Science; **1** патент РФ на изобретение; **9** работ в трудах российских и зарубежных научных конференций. Общее число докладов на российских и международных конференциях – **20**. Из них: **12** докладов представлено на **11**-ти международных конференциях, **1** доклад представлен на российской конференции, **6** докладов на **6**-ти конференциях МФТИ и **1** доклад на конференции молодых учёных г. Фрязино (Московская обл.).

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка цитируемой литературы, благодарностей. Объем работы составляет 129 страниц. Список цитируемой литературы содержит 89 наименований.

Личный вклад автора: все использованные в диссертации экспериментальные результаты получены автором лично или при определяющем его участии. Материалы, представленные в работе, получены в результате экспериментальных исследований, выполненных автором в лаборатории исследования материалов для квантовой электроники ФИРЭ РАН им. В.А. Котельникова и на кафедре фотоники (базовая организация НТО «ИРЭ-Полюс»)

факультета физической и квантовой электроники МФТИ (государственный Университет).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулированы научная новизна и защищаемые положения.

В **главе 1** приведен обзор литературы в исследуемых областях радио- и лазерной физики. Подробно описан метод радиочастотной импедансной спектроскопии и его применение для исследования радиофизических параметров диэлектриков. Объяснены физические принципы работы волоконных лазеров на основе многослойного оптического волокна с активной сердцевиной, легированной ионами редкоземельных элементов, оболочкой из плавленого кварца и защитной полимерной оболочкой. Представлены результаты исследований химических, механических и оптических свойств полимеров, используемых для покрытия волоконных кварцевых световодов. Основное внимание уделяется получившим широкое распространение в волоконной оптике полимерам группы полисилоксанов (PDMS). Проведен обзор экспериментальных и теоретических работ по исследованию тепловых эффектов в активной среде, возникающих при генерации и усилении излучения в волоконных лазерах. Рассмотрены работы, в которых были предложены теоретические модели разогрева различных оболочек оптоволокна на основе уравнения теплопроводности и рассмотрены различные тепловые эффекты в волокне. Также были даны оценки критических мощностей оптической накачки для основных тепловых эффектов и показано, что одним из главных факторов, ограничивающих рост мощности лазерного излучения, является тепловое разрушение защитной полимерной оболочки световода. В конце главы проведен обзор экспериментальных методик по измерению температуры в оптическом волокне, рассмотрены их преимущества и недостатки.

В **главе 2** описан интерференционный метод измерения температуры в сердцевине активных оптических волокон в режиме генерации лазерного излучения [4]. Для измерений был создан экспериментальный стенд, в котором одно из плеч волоконного интерферометра Маха-Цендера представляет собой волоконный лазер с оптической накачкой (см. рис. 1), и представлена методика для измерения усредненной по длине температуры в активной сердцевине волокна.

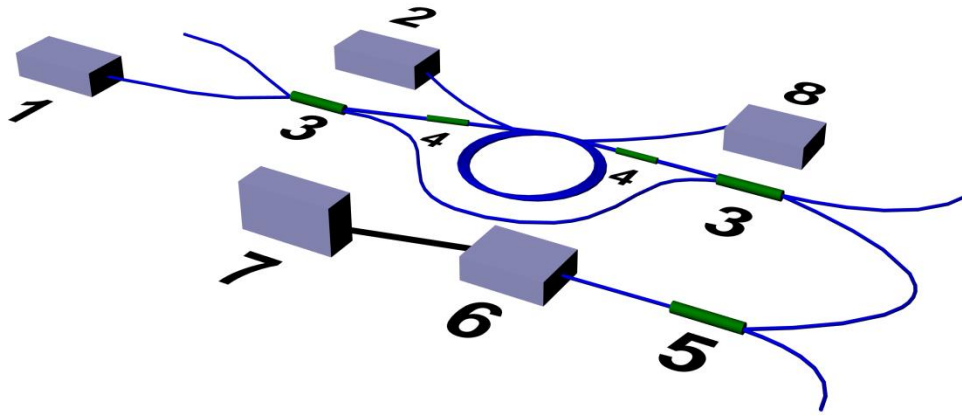


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. 1 – зондирующий лазер (длина волны $\lambda_1=1550$ нм), 2 – полупроводниковый диод оптической накачки (длина волны $\lambda_2=955-965$ нм), 3 – 50% оптоволоконные ответвители, 4 – брэгговские решётки на длине волны $\lambda_3=1063$ нм, 5 – оптический фильтр 1550/1060 нм, 6 – фотоприемник, 7 – персональный компьютер, 8 – измеритель оптической мощности

Источником зондирующего излучения являлся полупроводниковый DFB лазер с распределенной обратной связью **1** с длиной волны излучения $\lambda_1=1.56$ мкм и мощностью 1 мВт. Оптическая накачка активной среды осуществлялась полупроводниковым диодом **2**. Мощность оптического сигнала на выходе интерферометра измерялась фотоприемником **6**, подключенным к компьютеру **7**. Изменение фазы $\delta\varphi$, приобретаемое оптическим излучением при прохождении участка световода длиной L , составляло

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_1} nL, \quad (1)$$

где n – показатель преломления кварцевого стекла.

Тогда при изменении температуры T в одном из плеч интерферометра, разность фаз между плечами менялась на величину

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_1} \left(L \frac{dn}{dT} + n \frac{dL}{dT} \right) \Delta T. \quad (2)$$

Вследствие интерференции интенсивность излучения I на выходе интерферометра имеет вид

$$I = 2I_0(1 + \cos \Delta\varphi). \quad (3)$$

Таким образом, зная табличные значения производных dn/dT и dL/dT , по измеряемому фотоприемником интерференционному сигналу определялась температура разогрева сердцевины волокна. Изменение показателя преломления за

счет изменения электронной населенности основного и возбужденного энергетических уровней активных ионов не учитывалась.

В главе приведены результаты экспериментов по измерению температуры разогрева сердцевины волоконного лазера в условиях генерации лазерного излучения. На рис. 2 приведены зависимости разогрева сердцевины оптического волокна от поглощаемой мощности накачки для эксперимента с активным волокном в промышленном волоконном блоке, залитым дополнительным защитным слоем полимера (■), и с открытым волокном с тонкой полимерной оболочкой (●).

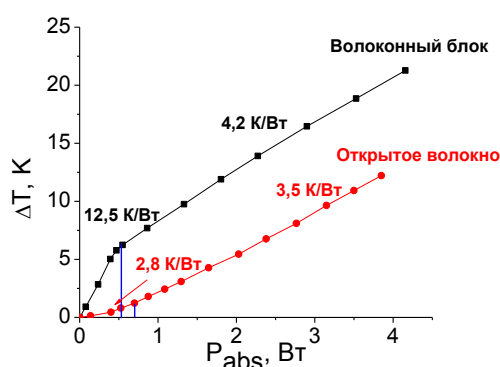


Рис. 2. Зависимости температуры разогрева сердцевины оптического волокна от поглощаемой мощности накачки волокна, залитого дополнительным слоем полимера в волоконном блоке (■), и открытого волокна на воздухе (●)

Из полученных в ходе эксперимента результатов было обнаружено несоответствие реального разогрева с известными теоретическими моделями. При исследовании волокна, залитого дополнительным слоем защитного полимера, был обнаружен нелинейный разогрев - резкое уменьшение коэффициента зависимости температуры от поглощаемой мощности накачки при достижении порога генерации лазерного излучения. Для оптоволокна без дополнительного полимера такого эффекта не наблюдалось. Было высказано предположение о том, что часть оптического излучения (многомодовое излучение накачки, спонтанная фотолюминесценция, изгибные оптические потери, оптическое излучение, рассеянное на дефектах и неоднородностях) может высвечиваться в полимерную оболочку волокна и поглощаться в ней, вызывая дополнительный разогрев. До достижения порога генерации возбуждение активных ионов снимается в виде излучения спонтанной фотолюминесценции. Так как волновые вектора люминесцентных фотонов не имеют определенной пространственной ориентации,

излучение фотолюминесценции распространяется во все стороны от активной среды, поглощаясь в полимерных оболочках. После перехода в режим генерации лазерное излучение распространяется вдоль активной сердцевины, практически не высвечиваясь в полимер. Чем больше толщина слоя полимера, окружающего кварцевую оболочку волокна, тем больше излучения поглощается в нем и тем сильнее его разогрев. Это особенно важно, так как тепловое разрушение полимерной оболочки является одним из самых главных факторов ограничения мощности волоконных лазеров и усилителей. Обнаруженный эффект определил дальнейшие задачи по исследованию свойств полимерного покрытия волокна.

В **главе 3** описывается экспериментальное исследование оптических спектров поглощения полимеров, используемых для покрытия кварцевых световодов и защиты сварных швов оптических волокон. Для исследования были взяты полимеры, широко используемые в волоконной оптике: Sylgard-182, Ps-200, FSX-17. Они относятся к классу полисилоксанов - органических полимеров, основой молекулярной структуры которых являются атомы кремния и кислорода. Для снятия оптических спектров использовался оптический спектроанализатор Newport OSM-400 с диапазоном измеряемых длин волн 200-1100 нм и разрешением 1 нм (рис. 3а). В результате экспериментов были получены спектры пропускания полимеров, обладающие ярко-выраженными пиками поглощения (рис. 3б).

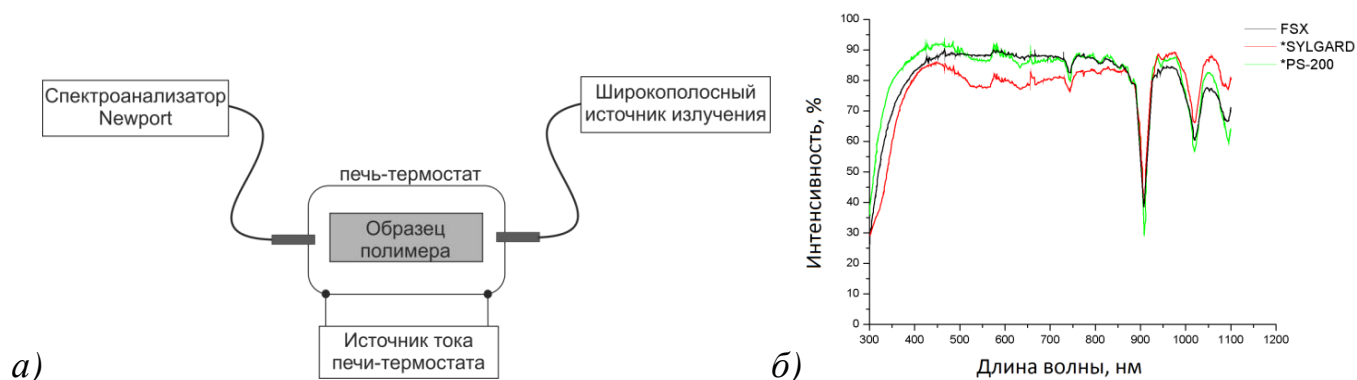


Рис. 3. а) Блок-схема экспериментальной установки по измерению оптического спектра пропускания полимеров б) Спектры оптического пропускания полимеров FSX-17, Sylgard 182, PS-200 при комнатной температуре

Сравнивая оптические спектры исследуемых полимеров со спектрами органических полимеров, оказалось, что пики поглощения исследуемых полимеров принадлежат главным образом высшим обертонам С-Н колебаний в группах CH_3 колебаний [5]. Самые существенные пики поглощения в полимере в исследуемом

диапазоне обнаружены на длинах волн 890-940 нм и 1000-1060 нм, которые пересекаются со спектральным диапазоном длин волн излучения накачки и фотолюминесценции мощных иттербиевых волоконных лазеров.

В **главе 4** представлены экспериментальные измерения температуры полимерной оболочки активного световода на основе метода радиочастотной импедансной спектроскопии. Так как было обнаружено, что полимер поглощает излучение в рабочем для иттербиевого волоконного лазера диапазоне длин волн, необходимо было разработать методику измерения температуры непосредственно в защитной полимерной оболочке. Для измерения электрических свойств различных материалов широко используется метод РЧ импедансной спектроскопии, на основе которой была разработана экспериментальная установка для исследования зависимости диэлектрической проницаемости используемых в волоконной оптике полимеров от температуры $\epsilon(T)$ в РЧ диапазоне. Образцы полимеров (PS-200 и Sylgard), а также плавленого кварца в виде пластин были помещены в плоский конденсатор, подключенный к измерительной схеме на основе РЧ-спектроанализатора Anritsu MS4630B со встроенным генератором (рис. 4а), в которой измерялась частотная зависимость адмиттанса конденсатора в диапазоне частот от 5 до 10 МГц. Конденсатор (рис. 4б) помещался в электрическую печь.

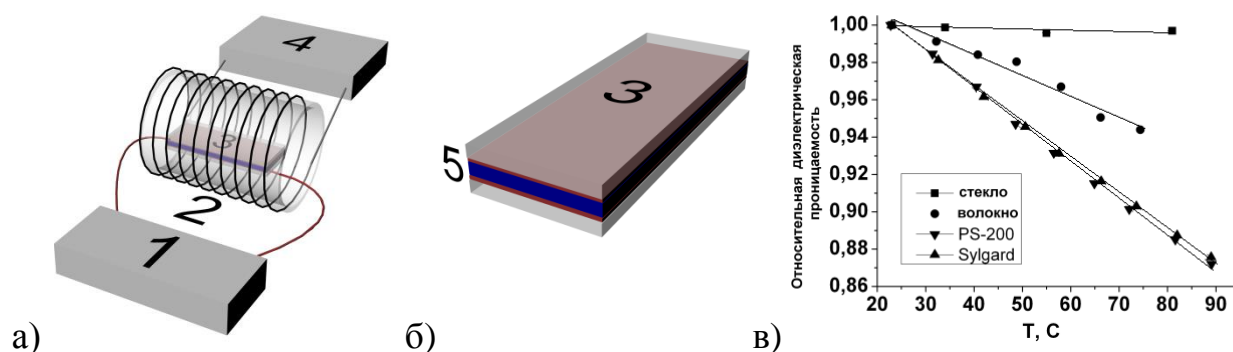


Рис. 4. а) Блок-схема экспериментальной установки. 1 – РЧ-спектроанализатор, 2 – электрическая печь, 3 – плоский конденсатор, 4 – источник питания печи. б) Плоский конденсатор. 5 – исследуемый образец в виде пластины в) Относительное изменение диэлектрической проницаемости в РЧ диапазоне исследуемых образцов от температуры

Модуль адмиттанса плоского конденсатора Y на частоте f равен:

$$|Y(f, T)| = 2\pi f C(T) = 2\pi f \frac{\epsilon_0 S}{d} \epsilon(T), \quad (4)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, C - емкость конденсатора, S - площадь его обкладок, d - расстояние между обкладками.

Из амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) плоского конденсатора рассчитывалась диэлектрическая проницаемость образцов. По результатам эксперимента была измерена зависимость диэлектрической проницаемости в радиочастотном диапазоне образцов полимеров и плавленного кварца от температуры (рис. 4в). Оказалось, что относительное изменение этого параметра от температуры для полимера на два порядка выше, чем для плавленного кварца. Также были проведены измерения температурной зависимости диэлектрической проницаемости отрезков оптического волокна, которые были уложены в конденсатор. Полученные экспериментальные результаты показали, что при разогреве кварцевого волокна изменение диэлектрической проницаемости в РЧ диапазоне зависит только от температуры полимерной оболочки.

Данные эксперименты позволили предложить методику измерения температуры полимерной оболочки волокна по измерению изменения диэлектрической проницаемости оптического волокна при его разогреве, используя метод РЧ импедансной спектроскопии. Для измерения разогрева активного волокна в условиях усиления мощного лазерного излучения была выбрана схема МОРА (master oscillator-power amplifier), состоящая из задающего волоконного лазера и последовательного мощного волоконного усилителя, температура полимерной оболочки которого подлежала измерению. Оптическая схема представлена на рис. 5.

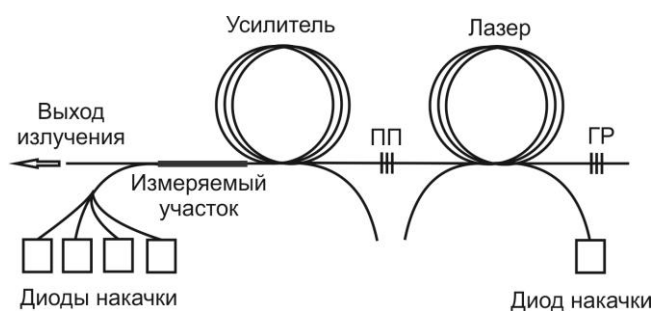


Рис. 5. Оптическая схема волоконного лазера с мощным усилителем. ПП – полупрозрачная волоконная брэгговская решетка (коэффициент отражения 1 дБ), ГР – глухая волоконная брэгговская решетка (коэффициент отражения >20 дБ)

Для оптической накачки лазера и усилителя использовались мощные полупроводниковые многомодовые лазеры с длиной волны излучения 955-965 нм. При этом для оптической накачки усилителя использовалось несколько таких

диодов, излучение которых заводилось в многомодовый вход активного волокна по оптическому объединителю. Усилительная схема позволяла при 120 Вт накачки усиливать сигнал задающего лазера с 8 Вт до 100 Вт. Эффективность преобразования накачки составляла 75%. Около 7% излучения накачки проходило оптическую схему без поглощения в активной среде и высвечивалось на выходе. Не менее 10% поглощенной мощности накачки переходило в тепло за счет разности энергии квантов накачки и генерации. Максимальное поглощение накачки и, следовательно, наибольший разогрев происходит в участке активного волокна, находящегося сразу у области ввода многомодовой накачки в усилитель, поэтому основные исследования тепловых эффектов проводились на этом участке. Исследуемый участок активного волокна помещался между двумя медными проводниками той же толщины, что и активное волокно, образуя гибкий двухпроводный конденсатор с волокном в качестве диэлектрического сердечника. Данная структура была намотана одним витком на полый цилиндрический стеклянный каркас 4 диаметром 50 мм, последовательно с катушкой индуктивности L. В результате такой конструкции получался электрический колебательный LC-контур, который подключался к РЧ спектроанализатору Anritsu 6 (рис. 6а).

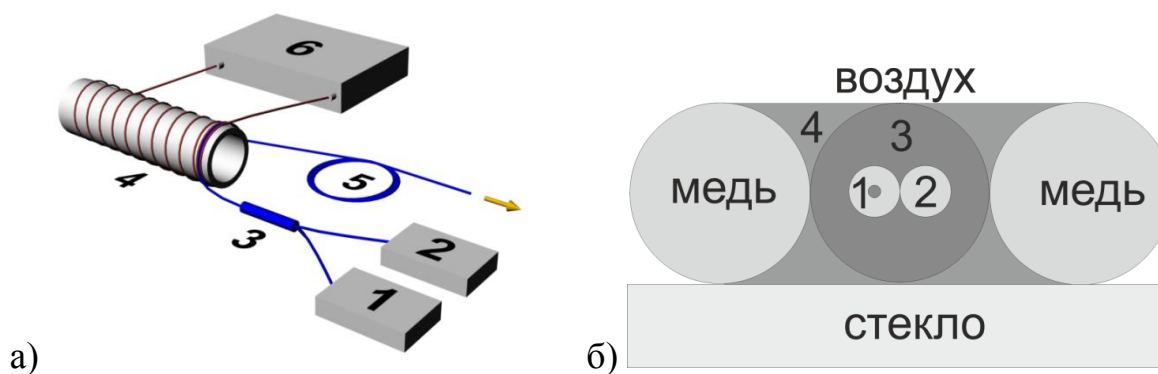


Рис. 6. а) Блок-схема экспериментальной установки для измерения температуры полимерной оболочки активного волокна. 1 - полупроводниковые диоды накачки, 2 – задающий волоконный лазер, 3 – область ввода накачки в волоконный усилитель, 4 – кварцевый цилиндр, 5 – волоконный усилитель, 6 – РЧ-спектроанализатор Anritsu б) Поперечное сечение двухпроводного конденсатора с активным волокном. 1 – одномодовое кварцевое волокно с активной сердцевиной, 2 – многомодовое кварцевое волокно, 3 – полимерная оболочка, 4 – фиксирующий полимер

Длина участка волокна в двухпроводном конденсаторе составляла ~ 15 см. Для увеличения коэффициента заполнения и стабильности положения волокна внутри

двухпроводного конденсатора и увеличения отклика резонансной частоты от температуры конденсатор был дополнительно залит полимером Sylgard, таким же по составу, что и полимерная оболочка волокна. Поперечное сечение такого конденсатора приведено на рис. 6б.

Резонансная частота последовательного колебательного контура определяется по хорошо известной формуле:

$$Rf(T) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC(T)}}. \quad (5)$$

Таким образом, формула (5) определяет соответствие между температурой полимерной оболочки волокна и резонансной частотой созданного вышеописанным образом резонансного контура.

Измерения состояли из двух этапов: 1) калибровка зависимости резонансной частоты LC-контура от однородной температуры полимера в нагревательной печи-термостате; 2) измерение резонансной частоты LC-контура в условиях лазерного усиления. На рис. 7 представлены АЧХ LC-контура и зависимость его резонансной частоты от температуры при однородном разогреве в термостате в ходе калибровки.

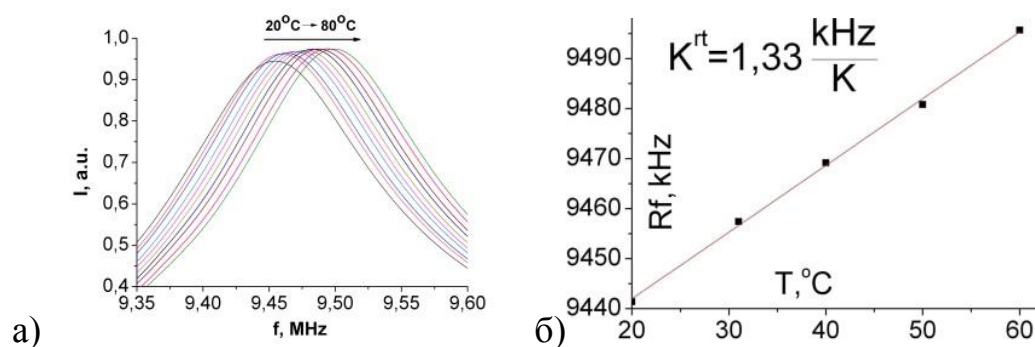


Рис. 7. а) Резонансные АЧХ LC-контура при разогреве в термостате б) График зависимости резонансной частоты контура от температуры

Наклон температурной зависимости резонансной частоты амплитудно-частотной характеристики контура определяет калибровочный резонансно-термический коэффициент LC-контура, составивший 1,33 кГц/К:

$$K^{rt} = \frac{dRf}{dT}. \quad (6)$$

Второй этап работы состоял в измерении резонансной частоты измерительного контура в зависимости от подаваемой мощности накачки P_{pump} , когда активное

волокно разогревалось за счет преобразования и поглощения в нем излучения. Экспериментальные результаты приведены на рис. 8а.

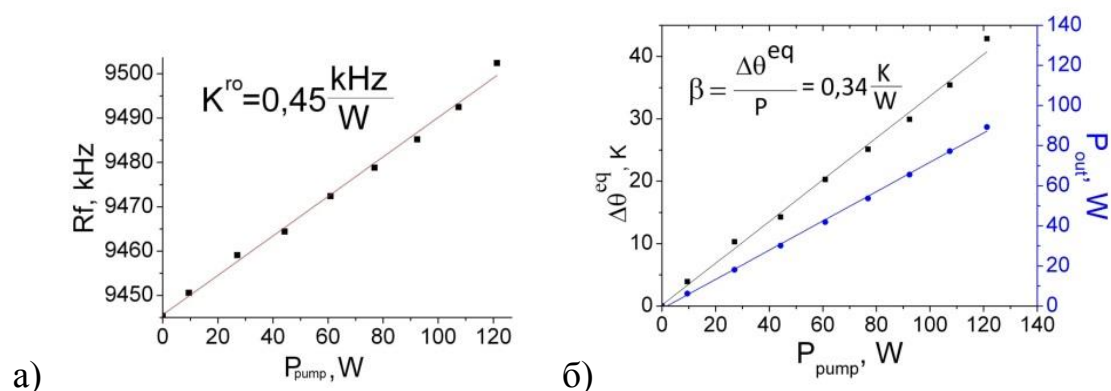


Рис. 8. а) Зависимость резонансной частоты измерительного контура от мощности оптической накачки б) Зависимость эквивалентной температуры разогрева полимерной оболочки (■) и выходной оптической мощности усилителя (●) от мощности накачки

Из результатов измерений был определен резонансно-оптический коэффициент, определяемый по формуле:

$$K^{ro} = \frac{dRf}{dP_{\text{pump}}}. \quad (7)$$

Зная резонансно-термический и резонансно-оптический коэффициенты, температура разогрева полимерной оболочки измеряемого участка (рис. 8б) равна:

$$\Delta\theta_{eq} = \frac{K^{ro}}{K^{rt}} P_{\text{pump}} = \beta P_{\text{pump}}. \quad (8)$$

где β - введенный коэффициент зависимости разогрева полимерной оболочки волокна от мощности накачки (термо-оптический коэффициент), θ_{eq} - эквивалентная температура полимерной оболочки. Эквивалентная температура отличается от термодинамической температуры $T(x,y,z)$ тем, что представляет собой некую усредненную по измеряемой области температуру неоднородно разогретого тела. Значение термо-оптического коэффициента составило 0,34 К/Вт. Таким образом, при 120 Вт накачки и 100 Вт выходной оптической мощности усилителя, эквивалентная температура полимера на самом разогретом участке усилителя достигала 40 градусов.

Другой этап исследований состоял в измерении температуры полимерной оболочки активных волокон, легированных ионами Yb и Er. Такое волокно используется для создания лазерной генерации на длине волны 1550 нм и широко

применяется в системах оптоволоконной связи. Большая разница энергий квантов накачки и генерации приводит к более сильному разогреву, чем для волокна, легированного ионами иттербия, при той же мощности оптической накачки. Дополнительно в ходе эксперимента было предложено исследовать вклад двух механизмов разогрева: разогрев за счет поглощения и преобразования накачки в активной среде и разогрев при прохождении усиленного лазерного излучения. Меняя места ввода излучения накачки и задающего лазера, на измеряемом участке можно было получать комбинации максимумов (120 Вт на входе) и минимумов (10 Вт на выходе) излучения накачки и максимумов (100 Вт на выходе) и минимумов (8 Вт на входе) усиленного лазерного излучения. Измеренные термо-оптические коэффициенты для всех конфигураций приведены в таблице 1.

Таблица 1

	Максимум оптической накачки	Минимум оптической накачки
Максимум усиленного излучения	1,06 К/Вт	0,21 К/Вт
Минимум усиленного излучения	0,98 К/Вт	0,12 К/Вт

Оказалось, что вклад механизма разогрева, связанного с поглощением оптической накачки в активной среде (размен квантов), на порядок выше, чем вклад поглощения усиленного лазерного излучения в активном волокне. Также был реализован эксперимент с пассивным волокном идентичной геометрии, но без легирования редкоземельными ионами. Оказалось, что даже без активной среды оптическая накачка приводит к разогреву полимерной оболочки начального участка волокна на 8 градусов при мощности накачки 120 Вт.

Для анализа модели разогрева оптического волокна был проведен новый эксперимент, в котором в той же экспериментальной установке вместо оптического волокна с кварцевой сердцевиной и полимерной оболочкой использовалась медная проволока диаметром 100 мкм, покрытая полимером той же толщины, что и оптоволоконно. Разогрев осуществлялся постоянным электрическим током, проходящим по проволоке. Известно, что сопротивление меди зависит от ее температуры. Использование проволоки позволяло простым способом измерять температуру металлической сердцевины в зависимости от известной выделяемой тепловой мощности. В данном эксперименте параллельно измерялось изменение сопротивления проволоки (пропорциональное изменению температуры проволоки) и изменение резонансной частоты колебательного контура методом импедансной

спектроскопии (пропорциональное изменению температуры полимера) от мощности электрического тока. Из этих измерений можно определить соответствие температур в медной сердцевине и полимерной оболочке (рис. 9 а).

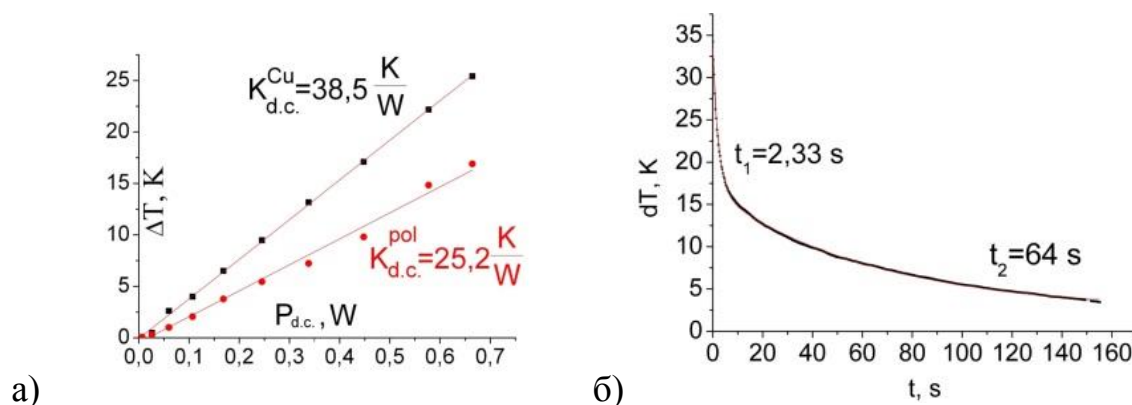


Рис. 9. а) Зависимость температуры разогрева медной сердцевины, измеренной по сопротивлению проволоки (■), и полимера, измеренной импедансным методом (●) от выделяемой в сердцевине электрической мощности. б) Кинетика изменения температуры медной проволоки в экспериментальной установке при охлаждении

Сопоставляя результаты и зная, что измеряемая электрическая мощность идет на разогрев медной проволоки, можно оценить долю оптической накачки, переходящей в тепло - 13,5%. Для сравнения тепловой вклад эффекта размена квантов η_q дает 10% при длине волны накачки 960 нм и генерации 1070 нм. То есть доля оптической мощности, переходящей в тепло, заметно выше вклада только механизма размена квантов, что подтверждает необходимость учета поглощения излучения в полимерной оболочке в модели разогрева.

Также проводилось измерение коэффициента теплообмена медной проволоки, покрытой полимером, и моделирующей оптическое волокно. Цель эксперимента состояла в измерении кинетики охлаждения проволоки от времени (рис. 9б). Медная проволока, разогревалась мощным электрическим током, а при выключении тока снималась временная зависимость сопротивления остывающей проволоки при помощи программируемого миллиомметра. Вследствие малых поперечных размеров исследуемых волоконных структур коэффициент теплообмена с окружающей средой h можно определить по формуле Ньютона-Рихмана:

$$T(t) = T_{out} + e^{-\frac{hSt}{C}} (T_0 - T_{out}), \quad (9)$$

где C – полная теплоемкость, S - площадь поверхности, T_0 - начальная температура, T_{out} - температура окружающей среды, t - время.

Рассчитанный из кинетики охлаждения проволоки с полимерным покрытием по формуле (9) коэффициент конвективного теплообмена полимера с окружающей средой h составил 65 ± 5 Вт/(м²*К).

В главе 6 описано математическое моделирование распределения электрического поля и температуры в конденсаторе с неоднородным диэлектрическим заполнением на основе широко применяемого в физике и инженерии программного пакета COMSOL Multiphysics. В программе была построена геометрическая модель использовавшегося в эксперименте конденсатора со встроенным активным волокном и заданы физические свойства материалов. Моделирование было проведено на основе решений двумерных уравнений Максвелла и теплопроводности методом конечных элементов для треугольного геометрического разбиения в плоскости поперечного сечения. Физические параметры используемых материалов брались из известных табличных значений.

Сначала было рассчитано распределение электрического поля в двухпроводном конденсаторе с активным волокном внутри него (рис. 10). Уравнения для расчета постоянного электрического поля:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad \vec{E}_e = -\vec{\nabla}U \quad \vec{n} \cdot \vec{D} = 0, \quad (10)$$

где ∇ - оператор набла, \vec{D} – вектор электрической индукции, \vec{E}_e – вектор напряженности электрического поля, U – электрический потенциал, \vec{n} – вектор нормали к границе сред, ρ_v – плотность не скомпенсированных свободных зарядов.

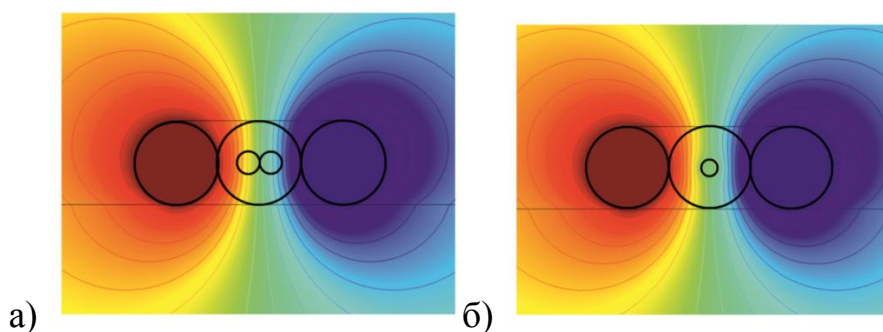


Рис. 10. Распределение электрического поля в двухпроводном конденсаторе с а) активным оптическим волокном б) медной проволокой, покрытой полимером

Используя математическое моделирование, была рассчитана емкость двухпроводного конденсатора (51,3 пФ при длине проводов 1м) и распределение электрического поля в среде. Замена кварцевой сердцевины оптического волокна на медный проводник не оказала существенного влияния на результаты расчета

емкости (52,1 пФ). Это позволяет считать, что электрические свойства конденсаторов в экспериментах с активным волокном и тонкой металлической проволокой, покрытой полимером, практически идентичны.

Также был проведен расчет распределения температуры в активном волокне в условиях усиления лазерного излучения. Модельный расчет строился на основе двумерного стационарного уравнения теплопроводности с граничными условиями:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = -Q \quad \vec{n} \cdot (k \nabla T) = 0 \quad \vec{n} \cdot (k \nabla T) = h(T_{ext} - T) \quad (11)$$

где ∇ – оператор набла, T – температура материала, T_{ext} – температура окружающей среды, k – коэффициент теплопроводности материала, h – конвективный коэффициент теплообмена, \vec{n} – вектор нормали к границе сред.

Результаты моделирования для самого разогретого участка для максимальной в нашем эксперименте мощности накачки в 120 Вт изображены на рис. 11. С учетом незначительной длины измеряемого участка плотность поглощенной мощности накачки в нем считалась равномерной по длине. На рис. 11а приведены результаты расчета на основе модели, в которой единственным источником тепла принимался обмен квантов генерации и накачки в активной сердцевине волокна. Расчет распределения температуры в активном волокне с учетом разогрева полимера за счет поглощения излучения накачки и фотолюминесценции в полимерной оболочке приведен на рис. 11б. На рис. 11в приведено распределение температуры для эксперимента с металлической проволокой, покрытой полимером и разогреваемой электрическим током.

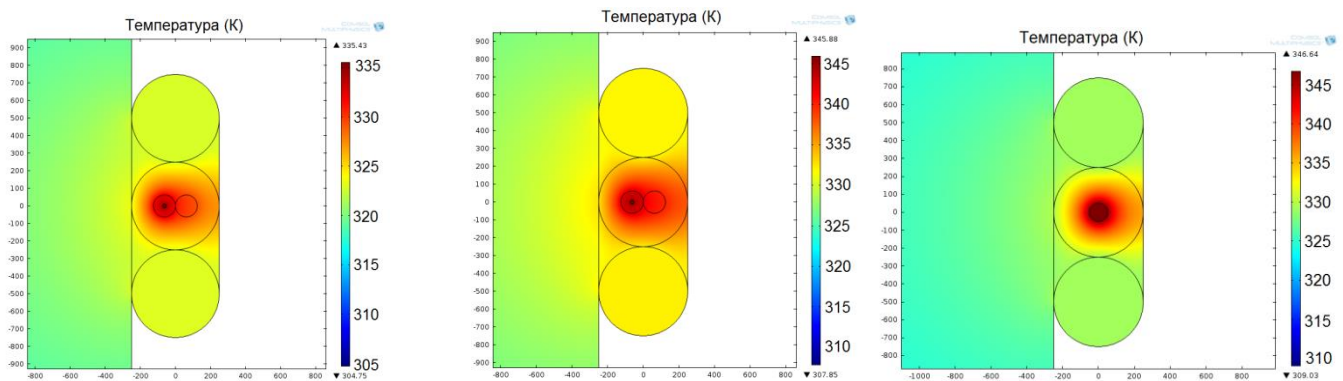


Рис. 11. Распределение температуры в двухпроводном конденсаторе а) с активным оптическим волокном без учета разогрева полимера б) с активным оптическим волокном с учетом разогрева полимера в) с медной проволокой, покрытой полимером

В конце главы приведено сравнение расчетных результатов с измеренными. Данные полученные в ходе экспериментов и математического моделирования были сведены в одну таблицу.

Таблица 2

1	2	3	4	5	6	7
	Эксп. данные для опто-волокна	Модельный расчет для оптоволокна без учета поглощения в полимере	Модельный расчет для оптоволокна с учетом поглощения в полимере	Эксп. данные для волокна с медной сердцевиной	Модельный расчет для волокна с медной сердцевиной	Модельный расчет для волокна с медной сердцевиной
P_{pump} , Вт	120	120	120	-	-	-
P_{therm} , Вт	-	1,2	1,6	0,65	0,65	1,6
ΔT_{core} , К	-	42	52	22	22,5	53
ΔT_{sil} , К	-	38	49	-	-	-
ΔT_{pol} , К	41	32	42	16,5	17,5	40,5

где P_{therm} - тепловая мощность, выделяемая на измеряемом участке, ΔT_{core} , ΔT_{sil} , ΔT_{pol} – температуры разогрева, соответственно, активной сердцевины, кварцевой и полимерной оболочек.

Из таблицы 2 видно, что модельный расчет разогрева волокна с учетом поглощения излучения в полимере (столбец 4) совпадает с экспериментальными результатами (столбец 2), а вот разогрев в модели, учитывающей только размен квантов оптической накачки и генерации в активной среде (столбец 3), оказался заметно ниже. Таким образом, моделирование подтвердило необходимость учета поглощения в полимерной оболочке волокна. Компьютерное моделирование также позволяет сопоставить экспериментально измеренную эквивалентную температуру полимера с разогревом отдельных оболочек волокна. Для волокна с медной сердцевиной также было получено соответствие результатов между экспериментом (столбец 5) и моделью (столбец 6). При равной выделяемой тепловой мощности разогрев волокна с медной сердцевиной (столбец 7) также хорошо коррелирует с разогревом оптоволокна с учетом поглощения излучения в полимере (столбец 4). Сравнение с известными экспериментальными методами измерения разогрева оптического волокна показало, что результаты измерений, полученных методом РЧ импедансной спектроскопии, соответствуют мировым данным. При этом метод РЧ спектроскопии гораздо точнее определяет температуру непосредственно

полимерной оболочки активного волокна, которая является наиболее критической областью для теплового разрушения волокна.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- Измерение оптических спектров полимеров, используемых в волоконной оптике, показало, что характерные пики поглощения излучения в полимерах попадают в диапазон длин волн излучения накачки и фотолюминесценции волоконных лазеров и усилителей, легированных ионами иттербия.
- Разработан экспериментальный стенд и представлена методика измерения температуры полимерной оболочки активных световодов в условиях усиления мощного оптического излучения на основе метода радиочастотной импедансной спектроскопии.
- Показано, что использование разогреваемой электрическим током медной проволоки в качестве сердечника полимерного волокна позволяет смоделировать условия тепловыделения в активном оптическом волокне, а также определить выделяемую тепловую мощность в сердцевине волокна и конвективный коэффициент теплообмена полимерной оболочки с окружающей средой.
- Используя математическое моделирование, на основе решений уравнений Максвелла и стационарного уравнения теплопроводности было рассчитано поперечное распределение электрического поля и температуры в активном оптическом волокне.

Представленная в работе методика позволяет измерять температуру не только в полимерной оболочке пассивных и активных волокон, но и исследовать другие типы световодов, включая полимерные оптические волокна.

Список использованной литературы:

- [1] Сайт компании IPG Photonics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/HP_Brochure.pdf.
- [2] Jeong, Y. Thermal characteristics of an end-pumped high-power ytterbium-sensitized erbium-doped fiber laser under natural convection / Y.Jeong [et al.] // Optics Express. – 2008. – V. 16. – P. 19865-19871.
- [3] Brown, D.C. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers / Brown D.C., Hoffman H.J. / IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2001. – V. 37. – № 2. – P.207-217.
- [4] Гайнов, В.В. Измерение температуры в сердцевине активных волоконных световодов в условиях лазерной генерации / В.В. Гайнов, Р.И. Шайдуллин, О.А. Рябушкин // Приборы и техника эксперимента. - 2010. - Т. 6. - С. 86-93.
- [5] Workman, L. Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy / Workman L., Weyer L. – CRC Press, 2007. – 332 p.

Список публикаций автора по теме диссертации:

1. Гайнов, В.В. Измерение температуры в сердцевине активных волоконных световодов в условиях лазерной генерации / В.В. Гайнов, Р.И. Шайдуллин, О.А. Рябушкин // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – Т. 6. – С. 86–93.
2. Гайнов, В.В. Стационарный разогрев активных волоконных световодов при оптической накачке / В.В. Гайнов, Р.И. Шайдуллин, О.А. Рябушкин // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41(7). – С. 637–643.
3. Шайдуллин, Р.И. Радиочастотная спектроскопия кварцевых световодов с полимерным покрытием / Р.И. Шайдуллин, О.А. Рябушкин // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39(12). – С. 79–85.
4. Рябушкин, О.А. Резонансная радиочастотная спектроскопия оптических волоконных структур в условиях усиления лазерного излучения / О.А. Рябушкин, Р. И. Шайдуллин, И.А. Зайцев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – Т. 9. – С. 57–65.
5. Ryabushkin, O.A. Radio-frequency spectroscopy of the active fiber heating under condition of high-power lasing generation / O.A. Ryabushkin, R.I. Shaidullin, I.A.Zaytsev // Optics Letters. – 2015. – V. 40(9). – P. 1972–1975.
6. Пат. 2013136142 Российская Федерация. МПК G01K11/26. Способ измерения температуры полимерного покрытия волоконного световода / Шайдуллин Р.И., Рябушкин О.А. – № 2013136142/28; заявл. 01.08.13; опубл. 10.02.15, Бюл. №4.
7. Шайдуллин, Р.И. Коаксиальная модель разогрева активного волокна в режимах фотолюминесценции и лазерной генерации в волоконном лазере / Р.И. Шайдуллин, В.В. Гайнов, О.А. Рябушкин // Сборник научных трудов VII Международной научной Конференции «Лазерная физика и оптические технологии». – 2008. – Т. III. – С. 461–464.
8. Shaidullin, R.I. Temperature measurements in the core of the active fibers doped by rare-earth ions at optical pumping / R.I. Shaidullin, V.V. Gainov, O.A. Ryabushkin // Proceedings, Optics Days 2010. – 2010. – P.75.
9. Шайдуллин, Р.И. Оптическая и радиочастотная спектроскопия полимеров волоконных световодов / Р.И. Шайдуллин, О.А. Рябушкин // Химия и технология полимерных и композиционных материалов, Москва, Россия. Сборник материалов. – 2012. – С. 318.
10. Шайдуллин, Р.И. Разогрев активного световода в режимах фотолюминесценции и лазерной генерации волоконного иттербиевого лазера / Р.И. Шайдуллин [и др.] // Труды 50-ой Научной конференции МФТИ, Москва–Долгопрудный, 2007. – Т. 5.– С. 88–91.
11. Шайдуллин, Р.И. Коаксиальная модель разогрева активного световода в режимах фотолюминесценции и лазерной генерации в волоконном лазере / Р.И. Шайдуллин, В.В. Гайнов, О.А. Рябушкин // Труды 51-ой Научной конференции МФТИ, Москва–Долгопрудный, 2008. – Т. 5.– С. 137–141.
12. Шайдуллин, Р.И. Изменение показателя преломления сердцевины активного волокна, легированного редкоземельными ионами при оптической накачке / Р.И. Шайдуллин, В.В. Гайнов, О.А. Рябушкин // Труды 52-ой Научной конференции МФТИ, Москва–Долгопрудный, 2009. – Т. 5.– С. 128–131.
13. Гайнов, В.В. Стационарный разогрев активных волокон, легированных редкоземельными ионами, в условиях оптической накачки / В.В. Гайнов, Р.И. Шайдуллин, О.А. Рябушкин // Труды 53-ой Научной конференции МФТИ, Москва–Долгопрудный, 2010. – Т. 5.– С. 218–220.
14. Шайдуллин, Р.И. Оптическая и радиочастотная спектроскопия полимеров активных световодов / Р.И. Шайдуллин, Д.А. Коржонов, О.А. Рябушкин // Труды 54-ой Научной конференции МФТИ, Москва–Долгопрудный, 2011. – Т. 5.– С. 139–141.
15. Шайдуллин, Р.И. Радиочастотная спектроскопия кварцевых световодов в условиях генерации излучения / Р.И. Шайдуллин, И.А. Зайцев, О.А. Рябушкин // Труды 56-ой Научной конференции МФТИ, Москва–Долгопрудный, 2013. – Т. 5.– С. 104–105.