

ОТЗЫВ

**официального оппонента о диссертации Колядина Антона Николаевича
"Полые револьверные волоконные световоды с отдельными капиллярами в
отражающей оболочке и их оптические свойства",
представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика»**

Проблема передачи лазерного излучения высокой интенсивности по световодам является одной из ключевых в волоконной оптике. Развитие технологий создания волоконных световодов со сложным профилем поперечного сечения в последние годы позволило разработать несколько направлений решения этой проблемы, и в частности, использование для передачи лазерного излучения световодов с полый сердцевинной. Именно в рамках развития этого направления выполнена диссертационная работа Антона Николаевича Колядина. В работе, с одной стороны, проводится оптимизация волноводной структуры для уменьшения оптических потерь, а с другой, исследуются эффекты, определяющие предельные уровни мощности лазерного излучения, передаваемого по волокну. Цели работы сформулированы достаточно четко.

Объектом исследования А.Н.Колядина являются так называемые револьверные световоды. Оптические потери при распространении излучения по полый сердцевине револьверного световода зависят от особенностей структуры капилляров, формирующих оболочку. Для того, чтобы выявить направления оптимизации структуры, необходимо провести как теоретические, так и экспериментальные исследования. Здесь следует отметить, что теория волоконных световодов создавалась изначально для стеклянных структур с цилиндрической симметрией, имеющих максимум показателя преломления вблизи оси структуры. Направленные моды, свойства которых хорошо изучены, могут распространяться вдоль оси такого световода в идеальном случае без потерь и спадают в оболочке в радиальном направлении. Согласно общепринятой классификации, вытекающие моды световода со ступенчатым профилем имеют эффективный показатель преломления меньше, чем показатель преломления оболочки и затухают вдоль оси световода, нарастая при этом в оболочке в радиальном направлении. Для револьверных световодов, имеющих минимум показателя преломления вблизи оси структуры, в настоящее время не имеется полного решения спектральной задачи. Из общих представлений известно, что моды такой структуры имеют излучательные потери и не могут быть отнесены к категории направленных. Актуальность детального теоретического исследования свойств электромагнитных полей в револьверных световодах не вызывает сомнений. Если в стеклянных световодах оптические

потери определяются поглощением материала и качеством изготовления структуры, то в случае револьверного световода уровень потерь определяется и излучательными эффектами, которые можно уменьшить, подобрав параметры структуры. При этом необходимо учитывать, что структура предназначена, прежде всего, для передачи излучения с высокой интенсивностью, и возможно разрушение тонких стенок капилляров. Существенно, что структура работает и в спектральной области среднего ИК диапазона, где вследствие большого поглощения в кварцевом стекле передача излучения большой интенсивности по стеклянному световоду невозможна.

Все вышеперечисленное, на мой взгляд, определяет актуальность и практическую значимость диссертационной работы Антона Николаевича Колядина.

Диссертация состоит из введения и четырех глав, включающих в себя как обсуждение результатов, известных из литературы, так и собственные исследования. Далее следует краткое заключение и список цитируемой литературы, включающий 203 источника. Общий объем диссертации составляет 122 страницы, включая 60 рисунков и одну таблицу. В начале работы имеется список используемых сокращений.

Во введении полые световоды характеризуются автором как новая перспективная среда для передачи излучения высокой интенсивности, рассматриваются различные типы таких световодов. При обсуждении актуальности работы особое внимание уделяется сравнению оптических потерь в полых и полностью стеклянных световодах. Отмечается, что геометрические параметры полого световода существенно влияют на его оптические свойства. Фотографии поперечного сечения револьверных световодов позволяют сделать вывод о хорошо разработанной технологии их изготовления в Научном центре волоконной оптики РАН (НЦВО РАН, организации, где выполнялась работа). Далее во введении сформулированы цели и задачи диссертации, приведены положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы, о публикациях, а также определяется личный вклад автора. Приводится краткое изложение содержания диссертационной работы по главам. Здесь в описании главы 2 впервые в работе отмечается, что для усовершенствования конструкции револьверного волоконного световода предложено сделать оболочку, состоящую из несоприкасающихся (разделенных) капилляров. Думаю, что такая информация была бы нужна перед пунктами о практической значимости работы и о положениях, выносимых на защиту, где упоминаются особенности предложенной конструкции.

Глава 1 дает представление о текущем состоянии исследований по теме диссертационной работы и содержит как обзор литературы, так и изложение физических принципов функционирования револьверных световодов с оригинальными расчетами автора. Обзор

начинается с описания более простых полых структур – отверстия в сплошном диэлектрике, стеклянного капилляра с тонкой стенкой. Для объяснения функционирования таких структур используются простые формулы, в которых не учитывается кривизна поверхности. Эта часть обзора имеет методический интерес. При обсуждении полых световодов с микроструктурированной оболочкой делается важный вывод о том, что их волноводные свойства определяются ближайшим окружением сердцевины, так что оптические потери практически не зависят от числа слоев в оболочке. Поэтому револьверные световоды, впервые разработанные и созданные в НЦВО РАН, имеют, по-видимому, оптимальную структуру оболочки полого световода, как в отношении волноводных свойств, так и технологии изготовления. Как следует из обзора, с 2011 г. проводились различные модификации формы и размеров капилляров в оболочке револьверного световода, а также создавались световоды не только из кварцевого, но и из инфракрасных стекол. Обзорная часть главы 1 заканчивается обсуждением применений полых световодов в различных областях и списком нерешенных проблем, как в теории, так и в экспериментальных исследованиях. Волноводные свойства револьверных световодов обсуждаются далее в рамках оптико-геометрического подхода. Вместе с тем, вводятся понятия мод полой сердцевины и мод оболочки. Здесь важно отметить, что такое разделение является условным, так как каждая мода характеризуется пространственный профилем по всему поперечному сечению световода. Поэтому моды оболочки – это те моды структуры, которые локализованы, в основном, в области оболочки и имеют минимум в полой сердцевине. В заключительной части главы 1 представлены рассчитанные спектры оптических потерь в так называемых «аналитических» моделях полого (отверстие в диэлектрике) и трубчатого световодов. Однако, отсутствует описание как моделей, так и способа определения потерь. Далее утверждается, что такие упрощенные модели позволяют определить и параметры револьверного световода, но какие-либо сравнительные оценки в главе 1 отсутствуют. В п.1.9.2 излагается методика расчета мод револьверных световодов в пакете программ Comsol Multiphysics. При этом нет описания собственно математической модели электромагнитных волн в револьверном световоде, обсуждения допущений модели и граничных условий.

Глава 2 начинается с описания предыстории разработки конструкции револьверного световода, в котором капилляры, формирующие оболочку, не соприкасаются друг с другом. На мой взгляд, такого развернутого описания не хватает во введении или в главе 1. Далее в п.2.1, названном «результаты численного моделирования», представлены рассчитанные в пакете программ Comsol Multiphysics спектры оптических потерь револьверных световодов, а также, для сравнения, трубчатых световодов. Не указано, каким образом в расчетах

определялись оптические потери. Результаты расчетов выглядят вполне убедительно и показывают, что световод с оболочкой, состоящей из несоприкасающихся капилляров, имеет преимущества по сравнению со световодом, оболочка которого состоит из стеклянных стержней или из соприкасающихся капилляров. Здесь можно провести аналогию со связанными микрорезонаторами, имеющими более широкую полосу резонансных частот и более низкую добротность по сравнению с отдельным микрорезонатором. Существенно, что, как отмечает автор, изготовить световод с разведенными капиллярами проще, чем с касающимися. Технология изготовления револьверного световода и методика измерения оптических потерь изложены достаточно хорошо, однако, не обсуждаются возможные или типичные технологические дефекты. Между тем, нарушение регулярности структуры по длине и возможные соприкосновения капилляров могут существенно влиять на спектр оптических потерь реального световода. Автор отмечает, что расхождение между расчетными и измеренными спектрами связано с многомодовым режимом распространения излучения в световоде. Однако, здесь не обсуждается, влияют ли на спектр технологические дефекты структуры. Главным результатом исследований, изложенных в главе 2, являются измеренные оптические потери револьверного световода в несоприкасающимися капиллярами, впервые изготовленного в НЦВО РАН. Показано, что эти потери на несколько порядков ниже оптических потерь кварцевого стекла в области длин волн до 8 мкм.

В Главе 3 продолжается обсуждение оптических характеристик револьверных световодов. Используется традиционный для теории оптических волноводов подход, а именно, электромагнитные волны представлены в виде мод, которые характеризуются пространственным профилем в поперечном сечении и величиной продольной постоянной распространения. Показано, что рассчитанные зависимости параметра дисперсии групповой скорости в области длин волн 1.5-1.7 мкм имеют близкие значения у моды световода с гладкой внутренней границей и световода с «отрицательной кривизной» границы. К сожалению, не указано, во-первых, для какой моды проведены расчеты, а во-вторых, учитывалась ли в расчетах дисперсия материала. Это не позволяет сделать вывод о том, насколько велик вклад внутримодовой дисперсии и дисперсии материала в полную дисперсию. Если внутримодовая дисперсия мала, то сходство кривых объясняется преобладающим вкладом дисперсии кварцевого стекла. При сравнении рассчитанных и измеренных дисперсионных кривых на рисунке 33 опять же возникает вопрос, насколько велик вклад дисперсии стекла. Небольшое расхождение кривых объясняется, как отмечает автор, возможными технологическими дефектами структуры револьверного световода. Далее

в работе исследуется взаимодействие мод структуры при нарушении ее регулярности – а именно, на изгибе револьверного световода. Измерение пропускания изогнутого револьверного световода на заданной длине волны при разном радиусе изгиба световода было проведено впервые. Полученная зависимость сигнала от радиуса изгиба имеет немонотонный характер, что объясняется обменом энергией между разными модами световода. Для исследования условий обмена энергией между модами в зависимости от радиуса изгиба были проведены приближенные оценки, в которых использовались формулы для параметров направляемых мод в пределе далеко от отсечки, известные из теории диэлектрического световода с бесконечной однородной оболочкой. По сути, взаимодействие мод сердцевины и оболочки исследовалось в упрощенной модели отверстия в диэлектрике. Тем не менее, эти оценки показывают, что передача мощности из мод сердцевины в моды оболочки имеет резонансный характер, что подтверждается сравнением с результатами строгого расчета спектров пропускания изогнутого револьверного световода. Спектральное положение полос пропускания, измеренного на разных длинах волн источника суперконтинуума, зависит от радиуса изгиба, в соответствии с результатами расчета.

Таким образом, результаты, изложенные в главах 2 и 3, подтверждают, что заявленные первая и вторая цели работы достигнуты.

В главе 4 представлены результаты исследований процесса разрушения полых световодов под воздействием высокоинтенсивного лазерного излучения (третья цель диссертационной работы). Механизмом разрушения является оптический разряд. Сложность поставленной цели определяется тем, что волноводные и теплофизические явления должны рассматриваться совместно. Поэтому автор начинает главу с литературного обзора по исследованиям оптического разряда в световодах со стеклянной сердцевиной, в полых трубчатых и фотоннокристаллических световодах. Изученные в работах предшественников физические особенности режимов распространения оптического разряда в полых световодах, уровни мощности лазеров, работающих в квази-непрерывном и импульсно-периодическом режимах, достигнутые скорости распространения оптического разряда стали основой для проведения экспериментальных исследований с револьверными световодами в работе А.Н.Колядина. Световоды из кварцевого стекла были изготовлены в ИЦВО РАН. В ходе эксперимента были получены фотографии участков световода не только до и после, но и во время прохождения по нему оптического разряда. Обработка снимков и численные оценки скорости и характерной длины распространения детонационной и ударной волн, а также давления в полый сердцевине во время распространения оптического разряда позволили создать достоверную физическую картину процесса распространения оптического разряда по

револьверному световоду. Для определения температуры в оптическом разряде был проведен спектральный анализ излучения плазмы. Разработанные в главе 4 оригинальные экспериментальные методики и полученные результаты составляют наиболее значимую для лазерной физики часть диссертационной работы А.Н.Колядина.

В заключении работы кратко суммируются полученные результаты и формулируются выводы по итогам проведенного исследования. В целом диссертация написана грамотно (хотя встречаются некоторые орфографические и пунктуационные ошибки). Автореферат диссертации полностью отражает ее основные положения.

Замечания по содержанию диссертационной работы:

- 1) При том, что в работе заявлена задача численного моделирования оптических свойств полых световодов, отсутствует описание собственно математических моделей, которые используются в расчетах, и свойств этих моделей (приближения, допущения).
- 2) Не указано, каким образом в расчетах определялись оптические потери.
- 3) Не обсуждаются возможные и типичные дефекты револьверных световодов, приводящие к нерегулярности структуры – изменение формы элементов структуры по длине световода, возможные соприкосновения капилляров. Влияют ли такие дефекты на результаты измерений?
- 4) В обозначении «композитной моды» на рисунке 36 должна быть мода HE_{21} , а не EH_{21} . В слабонаправляющих световодах моды TE_{01} и HE_{21} , имеющие близкую частоту отсечки, образуют моду LP_{11} .
- 5) В подписях к рисункам 23 и 24, а также в описании графиков в тексте не указан состав халькогенидного стекла.

Замечания по оформлению диссертационной работы:

- 1) Рисунок 22 с,d повторяет рисунок 3.
- 2) В п. 3.2.1 несколько формул не пронумерованы.
- 3) В подписи на рисунке 15 используется английский язык.
- 4) На рисунке 33 длины волн указаны в микрометрах, что ошибочно.

Переходя к итоговой оценке, хочу подчеркнуть, что высказанные в отзыве некоторые критические замечания не снижают общего положительного впечатления от результатов диссертационной работы, которые, как и защищаемые положения, обладают несомненной научной новизной, достоверны, и найдут применение как в лазерной физике, так и в волоконной оптике для среднего ИК диапазона. Результаты работы опубликованы в 5 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК и в трудах российских и международных конференций.

Диссертационная работа «Полые револьверные волоконные световоды с отдельными капиллярами в отражающей оболочке и их оптические свойства» Антона Николаевича Колядина соответствует паспорту специальности 01.04.21 и отвечает требованиям пп. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Считаю, что автор диссертационной работы Колядин Антон Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г.Чернышевского

Романова Елена Анатольевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Почтовый адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

E-mail: romanovaea@sgu.ru Телефон: 8(8452)511427

Согласна на обработку персональных данных

