

125009, г. Москва,
ул. Моховая, д.11, корп.7,
ФГБУН Институт Радиотехники и
Электроники им. В.А. Котельникова
Российской Академии Наук
Диссертационный совет Д002.231.01

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Савельева Евгения Александровича «Кластеризация иттербия в оптических волноводах на основе аморфного диоксида кремния», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния).

Актуальность. После того, как примерно 15 лет тому назад был впервые продемонстрирован непрерывный одномодовый волоконный иттербиевый лазер с выходной мощностью более 100 Вт началось быстрое развитие мощных волоконных иттербиевых лазеров как непрерывных, так и импульсных. Которое сопровождалось постоянными поисками путей снижения оптических потерь в активных световодах и повышения концентрации активных ионов с целью уменьшения длины лазерных световодов при соответствующем повышении порогов различных нелинейных явлений, ограничивающих максимальные мощности лазерного излучения. Вопросы исследования кластеризации ионов Yb^{3+} в световодах различного состава на основе кварцевого стекла, рассмотренные в настоящей диссертации, направлены на решение именно указанных выше задач и поэтому являются, несомненно, актуальными.

В первой главе диссертации приведен обзор литературы, фиксирующий уровень исследований в мире по вопросам, которым посвящена рассматриваемая диссертация. Кратко рассмотрены спектрально-люминесцентные свойства ионов редкоземельных металлов, наиболее важных для волоконной оптики, имеющиеся в литературе данные по растворимости редкоземельных ионов в стеклах на основе SiO_2 , процессы переноса энергии между ионами, различные типы процессов, приводящих к потере фотонов излучения накачки в волоконных лазерах, данные по влиянию концентрации ионов иттербия на оптические свойства лазерных световодов. И, поскольку в диссертации основную роль играет использование процесса SPCVD для изготовления световодов, то приведено его краткое описание.

Во второй главе диссертации описан процесс получения образцов световодов с помощью плазменного осаждения и дальнейшие механические операции для формирования световодов. Описаны установки для измерения спектров оптических потерь и люминесценции ионов иттербия в световодах. Следует подчеркнуть, что в подавляющем большинстве исследуемые образцы представляли собой не волоконные, а полосковые световоды. Их первоначальная структура, из-за особенностей процесса SPCVD, отражает термодинамически неравновесные условия осаждения частиц исходных веществ на холодную стенку кварцевой опорной трубы, и эта структура претерпевает изменения, приближаясь к более термодинамически равновесной, после дополнительного прогрева осажденных слоев до существенно более высокой температуры. Представлены результаты исследования материала световодов с помощью сканирующего и просвечивающего

электронных микроскопов, которые показали наличие или отсутствие кластеров в стекле световода, легированном иттербием, и трансформацию этого состояния после проплавления материала световода. Приведено подробное описание исследованных образцов и продемонстрировано формирование в ряде случаев достаточно крупных кластеров размером в десятки микрон, обладающих, главным образом, аморфной структурой. При высоких концентрациях иттербия и фосфора обнаружено (после прогрева) формирование кристаллических структур типа YbPO_4 .

В третьей главе приведены результаты измерения спектров оптических потерь световодов. Исходя из предположения, что в достаточно широком диапазоне спектра оптические потери обусловлены релеевским рассеянием на кластерах малого размера, выполнены оценки размеров таких кластеров. Установлено влияние вариации концентрации Al и Yb на формирование кластеров, показано, что в стеклах, содержащих только Yb и P, имеет место значительный рост размеров кластеров при проплавлении (в ~ 13 раз).

В четвертой главе представлены результаты исследования ИК и видимой люминесценции в образцах иттербиевых световодов. Измерены спектры и времена затухания люминесценции различных образцов, в том числе и при вариации условий возбуждения. Обнаружен интересный эффект значительного ослабления апконверсионной люминесценции небольшой примеси тулия при проплаве иттербиевых световодов, изготовленных методом SPCVD.

Новизна и достоверность. В диссертационной работе получен ряд принципиально важных новых результатов, имеющих как фундаментальное, так и прикладное значение. Впервые, используя особенности SPCVD технологии, исследованы процессы кластеризации в стеклах на основе SiO_2 , легированных иттербием и солегированных алюминием и фосфором. Получены данные об изменении состояния кластеризации в изготовленных таким образом стеклах, входящих в структуру полосковых волноводных структур. Показано, что нагрев $\nu\text{-SiO}_2$, легированного иттербием и фосфором в примерно равных атомарных концентрациях до температуры ~ 1600 С, приводит к значительному увеличению объема кластеров, в состав которых входят кристаллы YbPO_4 . Показано, что существуют составы стекол, прогрев которых и охлаждение в условиях выполненных экспериментов приводит к уменьшению размеров кластеров. Исследованы процессы релаксации возбуждения в синтезированных кварцевых стеклах. Эти результаты, а также другие результаты диссертации являются оригинальными и получены автором впервые. Этим определяется научная новизна работы. Высокий уровень экспериментальной работы, согласованность результатов, полученных различными методами убеждают в достоверности результатов представленной работы.

Научная и практическая значимость. Научная значимость работы заключается в ряде новых результатов по исследованию и трансформации состояния кластеров в ряде составов стекол, активированных иттербием, и полученных впервые. Наиболее интересны два из результатов диссертации: прямая демонстрация вариации состояния кластеров иттербия в кварцевом стекле в зависимости от «тепловой истории» образца и формирование кристаллов в составе кластеров определенного состава. Практическая значимость работы определяется тем, что ее результаты могут быть использованы при

анализе оптических потерь и кластеризации реальных волоконных световодов, легированных иттербием, для мощных волоконных лазеров. Исходя из вышесказанного, можно с уверенностью сказать, что научная и практическая значимость результатов диссертации высока.

Результаты исследования структуры стекол, полученных по SPCVD технологии и легированных иттербием, могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области волоконной оптики и мощных волоконных лазеров (НЦВО РАН, ИХВВ РАН, ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, ФИАН, ИПФ РАН и др.).

Диссертация Е.А. Савельева написана понятным языком и содержит достаточное количество иллюстраций. В ней четко сформулированы цели исследования, достаточно полно описаны и обсуждены полученные результаты.

В то же время, представленная работа не свободна от некоторых недостатков, которые можно сформулировать следующим образом. Отметим сразу, что эти **замечания** не носят принципиального характера.

1. В процессе изготовления образцов в представленной работе четко указано, что тепловая обработка осажденной структуры проводится в то время, когда полосковый волновод (или световод) еще является частью опорной трубы диаметром 20 мм, и скорость ее охлаждения значительно ниже, чем, например, волоконных световодов при вытяжке. Поэтому следовало, по-моему, специально указать в тексте, что полученные результаты не могут быть напрямую применены к описанию процессов при вытяжке 125 мкм световодов (чтобы у не очень внимательных читателей не возникало такого желания).
2. Известно (J.Kirchhof, S. Unger, OFC 1999, WM1-1; M.A. Melkumov et al. QE 34(9) 843(2004)), что в фосфоросиликатных волоконных световодах, содержащих только Yb и P (причем в очень широких пределах), время затухания люминесценции на 975 нм составляет 1.25-1.45 мс, что значительно больше, чем величины, приведенные в диссертации для стекол аналогичного состава. Чем обусловлены эти различия? И еще: в главе 4 измеренные значения времен жизни люминесценции приведены с 3-мя значащими цифрами. Означает ли это, что такова точность измерения этого параметра?
3. Насколько справедлива теоретическая оценка времени затухания кооперативной люминесценции иттербия, как в 2 раза короче, чем время затухания ИК люминесценции? На чем это основано?
4. Во введении содержится не вполне верное изложение истории возникновения первого волоконного лазера: первый волоконный лазер был создан Снитцером не в 1964 году (ссылка [2] в диссертации), а в 1961 (E.Snitzer, PRL, 7(12), 444 (1961)).

Эти замечания не влияют на общую высокую оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне.

Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Основные результаты диссертации опубликованы в 5 научных работах в отечественных

(Нелинейный мир) и зарубежных (Optical Materials Express, Optical Materials) журналах, доложены на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Е.А. Савельева является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение новой научной задачи о состоянии кластеризации иттербия в стеклах на основе SiO_2 , солегированных алюминием и фосфором, полученных по технологии SPCVD, и изменении этого состояния при дополнительном прогреве, а также об оптических характеристиках активных полосковых световодов на основе таких стекол. Решение этой задачи является важным этапом в развитии физики материалов волоконных лазеров, в том числе для продвижения по линии создания мощных иттербиевых лазеров с высоким КПД. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Е.А. Савельев заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Член-корреспондент Российской Академии Наук,
доктор физико-математических наук,
специальность 01.04.21 – лазерная физика,
заместитель директора по научной работе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Научный центр волоконной оптики
Российской Академии Наук
Буфетов Игорь Алексеевич
5 марта 2018 года.

Подпись И.А. Буфетова заверяю
Ученый секретарь
НЦВО РАН
к.ф.-м.н. В.М. Машинский

