

Оптические свойства ИК активных центров волоконных световодов из кварцевого стекла, легированного свинцом

А.С.Зленко, С.В.Фирстов, К.Е.Рюмки, В.Ф.Хопин, Л.Д.Исхакова,
С.Л.Семенов, И.А.Буфетов, Е.М.Дианов

Методом химического осаждения из газовой фазы впервые получены заготовки волоконных световодов с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного свинцом и не содержащего дополнительных легирующих примесей. На основе этих заготовок созданы дырчатые волоконные световоды. Подробно исследованы спектроскопические свойства таких световодов в диапазоне 400–1700 нм: измерены оптические потери, построен трехмерный график возбуждения–эмиссии люминесценции и измерены времена жизни люминесценции в основных максимумах.

Ключевые слова: свинец, висмут, световод, люминесценция, активный центр, кварцевое стекло.

1. Введение

Создание новых лазерных материалов является одной из приоритетных задач материаловедения и квантовой электроники. За последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс в создании совершенно нового лазерного материала – волоконных световодов на основе кварцевого стекла, легированных висмутом. После обнаружения в 1999–2001 гг. ИК люминесценции в легированных висмутом стеклах [1, 2], получения первых волоконных световодов такого состава [3] и демонстрации первого висмутового волоконного лазера [4], к настоящему времени за счет вариации состава стекла сердцевины висмутовых световодов создано семейство висмутовых волоконных лазеров, генерирующих в диапазоне длин волн 1150–1550 нм [5]. Эффективность таких лазеров в некоторых спектральных интервалах приближается к 50% [6, 7]. На основе висмутовых световодов созданы также волоконные усилители, позволяющие значительно расширить используемый частотный диапазон волоконных линий связи [8, 9].

К сожалению, серьезным препятствием на пути совершенствования висмутовых лазеров и усилителей является отсутствие адекватной модели ИК висмутового активного центра в оптических средах. И хотя было предложено несколько моделей ИК активных центров, основанных на присутствии атомов висмута в том или ином состоянии в стекле (например, Bi^{5+} [2, 10], Bi^+ [11–14], Bi_2^- , Bi_2^{2-} , $\text{Bi}_2/\text{Bi}_2^{2-}$ [15, 16], более полный перечень можно найти в [17]), ни одна из них не нашла достаточного экспериментального подтверждения. Существенно другой подход предложен в [18], где было обнаружено, что в определенных экспериментальных условиях в алюмогерманатных стеклах, леги-

рованных Bi , Pb , Sn , Sb , наблюдается ИК люминесценция, причем и примерно с таким же спектром, как и у стекла, легированного висмутом. На основании этих данных было сделано предположение о том, что источником ИК люминесценции являются дефекты сетки стекла независимо от вида легирующих атомов. Следует отметить, что, согласно экспериментальным результатам [18], спектры ИК люминесценции алюмогерманатных стекол, легированных Bi , Pb , Sn , Sb , действительно мало различались. В работе [19] было предложено рассматривать висмутовые активные центры в стеклах как некие аналоги активных центров, образующихся, например, в щелочногаллоидных кристаллах при их легировании таллием и свинцом. Роль активного центра в таких кристаллах играют один (или два) атома таллия (или свинца) с определенной валентностью, заместивших катионы, вместе с двумя (или одной) расположенной рядом анионной вакансией. Если висмутовые ИК центры в стекле на основе плавленого кварца представляют собой аналоги таких центров в кристаллах, то в стекле активный центр должен представлять собой совокупность одного (или пары) легирующих атомов вместе с дефектом структуры стекла – аналогом анионной вакансии. Наиболее вероятно, что на роль аналога анионной вакансии в плавленном кварце более всего подходит дефект структуры стекла, известный как кислородно-дефицитный центр.

ИК люминесценция, возникающая в легированных свинцом германосиликатных волоконных световодах, исследовалась ранее в [20], где были обнаружены значительные различия в люминесцентных свойствах германосиликатных световодов, легированных свинцом и висмутом (в отличие от алюмогерманатных световодов с Bi и Pb , исследованных в [18]). Наблюдаемые расхождения можно объяснить целым рядом обстоятельств: различиями в составах стекол в [18] и [20], различиями в технологиях изготовления образцов, наконец, различиями в химических свойствах висмута и свинца. С другой стороны, совпадения спектров Pb и Bi (как в [18]) можно ожидать в случае изоэлектронной структуры ионов Pb и Bi (как, например, для ионов Pb^+ и Bi^{2+}). Поэтому наблюдаемые в [20] различия могут быть обусловлены в том числе и неизоэлектронной структурой ионов Pb и Bi в этих материалах.

А.С.Зленко, С.В.Фирстов, К.Е.Рюмки, Л.Д.Исхакова, С.Л.Семенов, И.А.Буфетов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: aszlenko@fo.gpi.ru, fir@fo.gpi.ru, ldisk@fo.gpi.ru
В.Ф.Хопин. Институт химии высококачественных веществ РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; e-mail: vkhopin@mail.ru

Поступила в редакцию 20 января 2012 г.

Эксперименты [21, 22] показали, что наиболее «прозрачные» для интерпретации результаты могут быть получены в световодах самого простого состава, например с сердцевиной из двухкомпонентного стекла $\text{SiO}_2 + \text{Bi}$ (SBi-световод). Представляет интерес непосредственное сравнение люминесцентных свойств висмута и свинца в световодах с сердцевиной из чистого кварцевого стекла, легированного этими элементами. Все это определило цели настоящей работы: 1) создание световода с сердцевиной из чистого кварцевого стекла, легированного свинцом (SPb-световод); 2) исследование его оптических свойств; 3) сравнение SPb-световода с чисто кварцевым световодом, легированным висмутом (описание SBi-световода см. в [21, 22]), а также с легированным свинцом кварцевым световодом, дополнительно легированным германием (GSPb-световод) – для определения влияния легирования германием SPb-световода на его оптические свойства.

2. Технология изготовления волоконных заготовок и световодов

Заготовка для световода, легированного свинцом без дополнительных легирующих примесей, изготавливалась при помощи FCVD-технологии [23, 24] (Furnace Chemical Vapor Deposition – модифицированная MCVD-технология, согласно которой для прогрева участка опорной кварцевой трубки вместо водородно-кислородной горелки используется подвижная электрическая печь). На внутреннюю поверхность опорной кварцевой трубки осаждался пористый слой чистого SiO_2 , после чего осуществлялось легирование – пористый слой пропитывался раствором соли свинца. Раствор приготавливался путем растворения металлического свинца в азотной кислоте:



Для приготовления раствора использовались особо чистые реактивы. После пропитки пористый слой подвергался осушке, а затем остекловывался при температуре $\sim 1900^\circ\text{C}$. Затем кварцевая трубка консолидировалась при температуре $\sim 2100^\circ\text{C}$. Концентрация свинца в сердцевине заготовки не превышала порога чувствительности нашей аппаратуры (0.02 ат. %), как и в большинстве подобных опытов с висмутом [5]. Поскольку такой низкий уровень легирования не мог существенно влиять на коэффициент преломления сердцевины, то отражающая оболочка формировалась с помощью кольца из шести отверстий, просверленных в заготовке. После этого при подаче в отверстия аргона из нее был вытянут световод, фотография поперечного сечения которого представлена на рис.1. Диаметр оболочки составляет 125 мкм, средний диаметр сердцевины – примерно 10 мкм. При указанном диаметре сердцевины световод является многомодовым.

Германосиликатный световод, легированный свинцом, изготавливался по стандартной MCVD-технологии. Пористый слой также осаждался на внутреннюю поверхность опорной трубки, но в этом случае он состоял из 95 мол. % SiO_2 и 5 мол. % GeO . Легирование свинцом осуществлялось таким же образом путем пропитки слоя раствором нитрата свинца. Дополнительную информацию о данном световоде можно найти в [20].

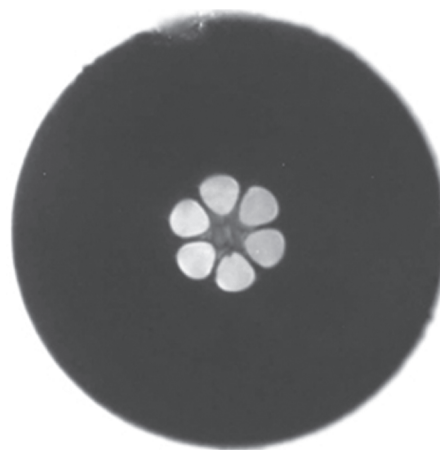


Рис.1. Фотография поперечного сечения волоконного SPb-световода.

3. Методы исследования волоконных световодов

Оптические потери в световодах измерялись методом облома – путем сравнения пропускания излучения отрезками световода различной длины (от нескольких сантиметров до 10 м). Люминесценция сердцевины регистрировалась через боковую поверхность световода (для исключения влияния перепоглощения излучения). Для возбуждения люминесценции на различных длинах волн использовался источник излучения суперконтинуума SC450 (Fianium). Узкополосное ($\Delta\lambda = 3$ нм) излучение (λ_{ex}) выделялось из широкого спектра с помощью акустооптического фильтра и вводилось в сердцевину световода. Мощность введенного излучения в каждом измерении не превышала 1 мВт. Спектры люминесценции регистрировались спектроанализатором HP70950B в диапазоне длин волн $875 \text{ нм} < \lambda_{\text{em}} < 1700 \text{ нм}$ и спектрометром SP2000 (Ocean Optics) для $450 \text{ нм} < \lambda_{\text{em}} < 875 \text{ нм}$. Таким образом, были получены спектры люминесценции SPb-световода при изменении λ_{ex} в диапазоне 450–1700 нм с шагом 10 нм. Для сравнения были измерены аналогичные зависимости $I_{\text{lum}}(\lambda_{\text{ex}}, \lambda_{\text{em}})$ для германосиликатного световода, легированного свинцом, в диапазоне $\lambda_{\text{ex}} = 600\text{--}1500 \text{ нм}$ и $\lambda_{\text{em}} = 770\text{--}1700 \text{ нм}$. Величина шага изменения λ_{ex} определяла точность измерения положения максимумов зависимости $I_{\text{lum}}(\lambda_{\text{ex}}, \lambda_{\text{em}})$ по длинам волн. Полученные спектры люминесценции были скорректированы на спектральную чувствительность канала регистрации и нормировались на введенную в световод мощность возбуждающего излучения. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Для исследования более слабых полос люминесценции использовались более мощные источники накачки: вторые гармоники излучения твердотельных неодимовых лазеров, работающих на длинах волн 914 и 1064 нм, излучение гелий-неонового лазера (633 нм) и одномодовых лазерных диодов (808, 975 и 1310 нм), а также иттербиевого волоконного лазера (1058 нм). Мощность излучения накачки при этом составляла десятки милливатт.

4. Результаты и их обсуждение

Спектры оптических потерь SPb- и GSPb-световодов представлены на рис.2. Поскольку диапазоны изменения оптических потерь этих световодов в рассматриваемом

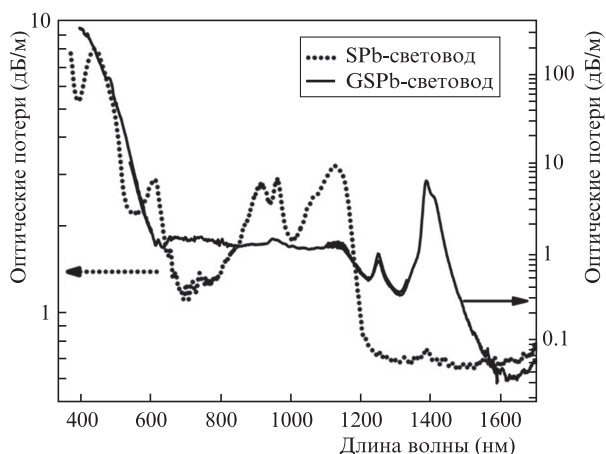


Рис.2. Спектры оптических потерь в SPb- и GSPb-световодах.

диапазоне длин волн значительно различаются, масштабы по вертикальной оси для каждого графика выбраны различными.

В спектре оптических потерь SPb-световода наблюдается широкая полоса поглощения в ИК области с центром на ~ 1130 нм и потерями 3.2 дБ/м в максимуме, которая является, по-видимому, полосой поглощения ИК активных центров, связанных с присутствием атомов свинца. В области длин волн короче 1 мкм имеют место максимумы оптических потерь на 438, 606, 910 и 960 нм, а также локальный минимум потерь на длине волны около 400 нм. Отметим, что подобный минимум наблюдается и в спектрах SBi-световодов, изготовленных по различным технологиям [24–26].

Спектр оптических потерь GSPb-световода значительно отличается от спектра SPb-световода. Во-первых, в нем есть интенсивные линии поглощения на 1.24, 1.38 и 1.41 мкм, что свидетельствует о значительной концентрации групп ОН (и что объясняется различиями в технологии изготовления). Затем, на отрезке 600–1150 нм практически отсутствуют ясно выраженные максимумы поглощения. Наконец, в коротковолновой части ($\lambda < 600$ нм) наблюдается значительный (на два порядка) рост оптических потерь. Таким образом, мы видим, что спектр SPb-световода позволяет выделить существенно больше характерных деталей, чем спектр оптических потерь GSPb-световода.

Измеренные в широкой области спектры люминесценции в сочетании с пошаговым изменением длины волны возбуждающего излучения позволили построить зависимости $I_{lum}(\lambda_{ex}, \lambda_{em})$ для SPb- и GSPb-световодов (рис.3). Эти зависимости представляют собой контурные графики, в которых сочетаются спектры люминесценции (вдоль горизонтальной оси) и спектры возбуждающего излучения (вдоль вертикальной оси).

На приведенных графиках отношение максимального и минимального значений I_{lum} выбрано равным ~ 100 , что ограничивает объем отображаемой в них информации (это касается областей с низкой интенсивностью люминесценции). Но без такого ограничения трехмерные графики люминесценции получаются практически нечитаемыми, поэтому следует учесть, что на них отображены только основные пики наблюдаемой люминесценции.

Обозначения наблюдаемых пиков люминесценции, используемые на графиках $I_{lum}(\lambda_{ex}, \lambda_{em})$, и соответствующие максимумам этих пиков длины волн возбуждения и эмис-

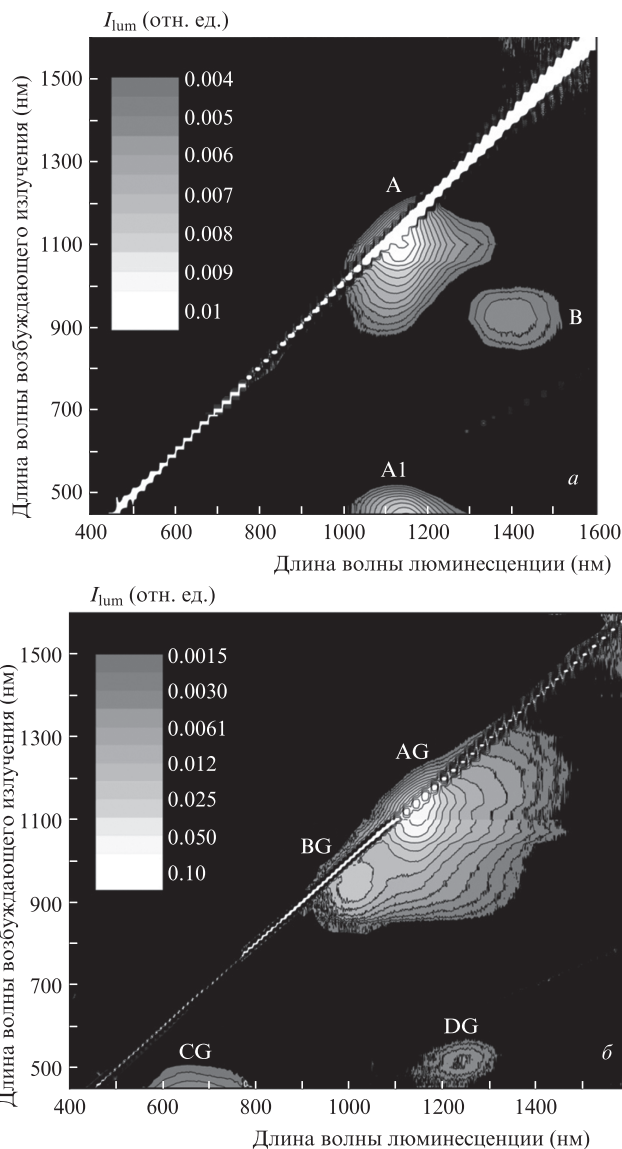


Рис.3. Зависимости интенсивности люминесценции от длины волны возбуждающего и длины волны люминесценции для SPb- (а) и GSPb-световодов (б).

сии представлены в табл.1. В дальнейшем для обозначения максимума люминесценции будут использоваться его буквенное обозначение в табл.1 (или на рис.3), а также соответствующие ему длины волн возбуждения и эмиссии, например А ($\lambda_{ex}^{max}, \lambda_{em}^{max}$).

Спектры люминесценции обоих световодов представляют собой совокупность пиков, которые часто имеют сложную форму и налагаются друг на друга. Ширины пиков люминесценции на графиках $I_{lum}(\lambda_{ex}, \lambda_{em})$ достигают

Табл.1. Обозначения, длины волн возбуждения и люминесценции основных максимумов люминесценции SPb- и GSPb-световодов.

Волоконные световоды	Полоса люминесценции	λ_{ex}^{max} (нм)	λ_{em}^{max} (нм)
SPb	A	1100	1145
SPb	A1	450	1145
SPb	B	930	1400
GsPb	AG	1140	1155
GSPb	BG	947	1011
GSPb	CG	<450	670
GSPb	DG	510	1240

~100 нм или больше. На обоих приведенных графиках $I_{lum}(\lambda_{ex}, \lambda_{em})$ наблюдается линия, проходящая по диагонали $\lambda_{em} = \lambda_{ex}$ через весь рисунок, которая соответствует рассеянному излучению возбуждения. Показано также излучение второго порядка дифракции рассеянного излучения накачки в виде участка линии $\lambda_{em} = 2\lambda_{ex}$.

Спектр возбуждения–люминесценции SPb-световода (рис.3,а) содержит всего три основные области максимальной люминесценции – А, А1 и В (см также табл.1). Области люминесценции имеют несимметричную форму (особенно область А), что является свидетельством их сложной структуры. Полосы А и А1 при различных длинах волн возбуждения имеют очень близкие длины волн люминесценции, что указывает, по-видимому, на их принадлежность к одному активному центру.

Спектр возбуждения–люминесценции GSPb-световода (рис.3,б) значительно отличается от спектра SPb-световода. Прежде всего здесь присутствует полоса красной люминесценции CG (450 нм, 670 нм), аналога которой на рис.3,а не наблюдается, а также новые полосы люминесценции – DG и BG. Кроме того, не наблюдается полоса люминесценции с максимумом на 1400 нм (аналог полосы В на рис.3,а отсутствует). В то же время в SPb- и GSPb-световодах наиболее интенсивные полосы люминесценции (А, рис.3,а и AG, рис.3,б) очень близки по длинам волн возбуждения и люминесценции.

Спектры люминесценции SPb-световода при накачке излучением большей мощности (несколько десятков мВт) представлены на рис.4. В отличие от рис.3, интенсивности люминесценции на рис.4 приведены в относительных единицах, не связанных между собой для отдельных кривых. Отметим, что при накачке на длине волны 1310 нм люминесценция в световоде в исследуемом диапазоне длин волн не наблюдалась.

При возбуждении SPb-световода на всех шести выбранных длинах волн с большей или меньшей интенсивностью наблюдается люминесценция на длинах волн около 1145 нм. Это соответствует люминесценции в различных сечениях областей А и А1 на рис.3,а. Вследствие асимметрии этих областей длины волн, соответствующие

максимумам люминесценции, несколько изменяются с длиной волны возбуждения. Так, при возбуждении на 457, 532, 633, 808, 975 и 1058 нм наблюдается пик люминесценции с максимумами на 1145, 1125, 1120, 1090, 1125 и 1145 нм соответственно.

При накачке на 532, 633 и 808 нм имеет место также люминесценция на длинах волн 880, 870 и 875 нм соответственно, которая отсутствует на рис.3,а из-за сравнительно низкой интенсивности. Кроме того, при $\lambda_{ex} = 633$ и 808 нм наблюдается люминесценция с $\lambda_{em}^{max} = 1464$ и 1428 нм, что, возможно, может быть отнесено к области люминесценции В на рис.3,а. Тот факт, что наблюдаемая при повышенной интенсивности излучения возбуждения люминесценция на 1400 нм имеет меньшую интенсивность, чем люминесценция на 870 нм, которая на рис.3,а не регистрируется, может быть объяснен зависимостью формы спектра люминесценции от интенсивности возбуждения, как это имеет место в ряде случаев для висмутовых световодов [27].

На нескольких спектрах люминесценции у полос с максимумом примерно на 1145 нм наблюдается плечо на длине волны около 1330 нм с амплитудой, примерно на порядок меньшей, чем величина пика люминесценции в полосе с $\lambda_{em}^{max} = 1145$ нм.

Подчеркнем, что при накачке на 457, 975 и 1058 нм возбуждается, главным образом, люминесценция в полосе 1145 нм. При возбуждении же на 532, 633 и 808 нм в спектре люминесценции появляются полосы на 870 и 1450 нм (рис.3,а, 4). Поэтому можно предположить, что в SPb-световоде существуют по меньшей мере два типа активных центров. К одному из них относятся полосы поглощения на 600 нм и полосы люминесценции на 870 и 1450 нм (обозначим этот центр как тип 1), к другому – полоса люминесценции на 1150 нм и полоса поглощения на 1100 нм (тип 2). В световодах же SBi до настоящего времени был обнаружен только один ИК висмутовый активный центр [21, 22] плюс красная люминесценция ионов Bi^{2+} . Причем полос люминесценции, относящихся к каким-либо другим ИК центрам, не было обнаружено ни при измерениях трехмерных спектров возбуждения–эмиссии люминесцен-

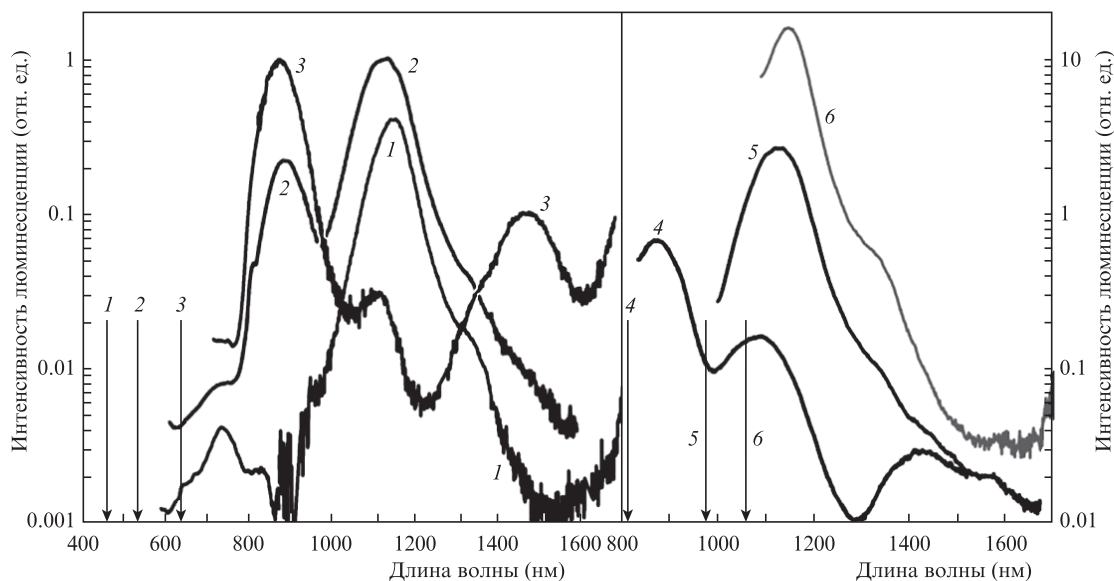


Рис.4. Спектры люминесценции SPb-световода при возбуждении излучением с длинами волн $\lambda_{ex} = 457$ (1), 532 (2), 633 (3), 808 (4), 975 (5) и 1058 нм (6). Стрелками с теми же цифрами обозначено положение длин волн возбуждающего излучения.

ции [7, 21], ни при возбуждении люминесценции в случае повышенных интенсивностей излучения накачки [26], как это было выполнено и в нашей работе со световодом SPb.

В настоящей работе была также исследована кинетика релаксации люминесценции SPb-световода в полосах с максимумом на 1150 нм (активный центр типа 2) и 870 нм (тип 1) при возбуждении на различных длинах волн. Во всех случаях релаксация люминесценции имела одноэкспоненциальный характер с временем релаксации $\tau_A = 60$ мкс для люминесценции на ~ 1150 нм и $\tau_D = 30$ мкс для люминесценции на ~ 870 нм. В GSPb-световоде люминесценция в диапазоне 1100–1300 нм имеет двухэкспоненциальный характер, причем со сравнимыми амплитудами экспонент, относящихся к различным временам. Короткое время релаксации составляет 4.5 мкс, а длинное – 40 мкс. Таким образом, дополнительное легирование германием SPb-световода модифицирует его спектр люминесценции, практически не изменяя основного максимума в ИК диапазоне и несколько уменьшая время релаксации люминесценции.

5. Выводы

В процессе выполнения настоящей работы впервые создан волоконный световод с чисто кварцевой сердцевинной, легированной свинцом, и исследованы его оптические свойства. Впервые получены трехмерные спектры возбуждения–эмиссии SPb- и GSPb-световодов. Показано, что основной максимум ИК люминесценции SPb-световода лежит около 1150 нм. Время жизни люминесценции в этом максимуме примерно на порядок меньше, чем в висмутовом световоде такого же состава, и составляет около 60 мкс. В SPb-световоде обнаружено два активных центра, люминесцирующих в ИК области и различающихся спектрами возбуждения и люминесценции. В отличие от алюмогерманатных световодов, спектры люминесценции которых при легировании как висмутом, так и свинцом, очень похожи [18], в спектрах люминесценции световодов с сердцевинной из чистого кварцевого стекла и из германосиликатного стекла имеются большие различия, что в свою очередь ставит новые вопросы при поиске адекватной физической модели ИК активных центров.

1. Murata K., Fujimoto Y., Kanabe T., Fujita H., Nakatsuka M. *Fusion Eng. Design*, **44**, 437 (1999).
2. Fujimoto Y., Nakatsuka M. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L279 (2001).
3. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M., Umnikov A.A., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Proc. Europ. Conf. Opt. Commun.* (Glasgow, UK, 2005, paper Th 3.3.5).

4. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 1083 (2005).
5. Bufetov I.A., Dianov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 487 (2009).
6. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Khopin V.F., Firstov S.V., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7580**, 758014 (2010).
7. Фирстов С.В., Шубин А.В., Хопин В.Ф., Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Медведков О.И., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **41**, 581 (2011).
8. Melkumov M.A., Bufetov I.A., Shubin A.V., Firstov S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **36**, 2408 (2011).
9. Дианов Е.М., Мелькумов М.А., Шубин А.В., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **39**, 1099 (2009).
10. Ohkura T., Fujimoto Y., Nakatsuka M., Young-Seok S. *J. Am. Ceram. Soc.*, **90**, 3596 (2007).
11. Peng M.Y., Qiu J.R., Chen D.P., Meng X.G., Zhu C.S. *Opt. Lett.*, **30** (18), 2433 (2005).
12. Qiu Y.Q., Shen Y.H. *Opt. Mater.*, **31** (2), 223 (2008).
13. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Bulatov L.I., Bufetov I.A., Shubin A.V., Melkumov M.A., Kustov E.F., Dianov E.M., Umnikov A.A., Khopin V.F., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Opt. Lett.*, **31**, 2966 (2006).
14. Truong V.G., Bigot L., Lerouge A., Douay M., Razdobreev I. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 041908 (2008).
15. Khonton S., Morimoto S., Arai Y., Ohishi Y., Suranaree J. *Sci. Technol.*, **14**, 141(2007).
16. Sokolov V.O., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **33**, 1488 (2008).
17. Peng M., Dong G., Wondraczek L., Zhang L., Zhang N., Qiu J. *J. Non-Cryst. Sol.*, **357**, 2241 (2011).
18. Sharonov M.Yu., Bykov A.B., Petricevic V., Alfano R.R. *Opt. Lett.*, **33**, 2131 (2008).
19. Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **40**, 283 (2010).
20. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Abramov A.N., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Express*, **17**, 13487 (2009).
21. Firstov S.V., Khopin V.F., Bufetov I.A., Firstova E.G., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Express*, **19**, 19551 (2011).
22. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.A., Shubin A.V., Semenov S.L., Vel'miskin V.V., Levchenko A.E., Firstova E.G., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **36**, 166 (2011).
23. Malinin A.A., Zlenko A.S., Akhmetshin U.G., Semjonov S.L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7934**, 793418 (2011).
24. Zlenko A.S., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Denisov A.N., Iskhakova L.D., Mayorova M.S., Medvedkov O.I., Semenov S.L., Vasiliev S.A., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **36**, 2599 (2011).
25. Razdobreev I.E., El Hamzaoui H., Ivanov V.Yu., Kustov E.F., Capoen B., Bouazaoui M. *Opt. Lett.*, **35**, 1341 (2011).
26. Буфетов И.А., Семенов С.Л., Вельмискин В.В., Фирстов С.В., Буфетова Г.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **40**, 639 (2010).
27. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Медведков О.И., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **39**, 299 (2009).