

Поляризованная люминесценция висмутовых активных центров в германосиликатных стеклах

К.Е.Рюмкин, С.В.Фирстов, А.М.Хегай, А.В.Харахордин, С.В.Алышев, М.А.Мелькумов

Исследована поляризованная люминесценция висмутовых активных центров в германосиликатных стеклах. Обнаружено различие в интенсивностях компонент люминесценции на $\lambda = 1.4$ мкм с ортогональными состояниями поляризации при возбуждении линейно поляризованным излучением на $\lambda = 1.26$ мкм. Степень поляризации достигает ~ 0.12 . Увеличение концентрации висмутовых активных центров приводит к снижению степени поляризации люминесценции в исследованном диапазоне.

Ключевые слова: поляризованная люминесценция, анизотропия оптических центров, висмут, активные световоды.

1. Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке широкополосных волоконно-оптических усилителей и перестраиваемых лазеров для ближнего ИК диапазона. Перспективным с этой точки зрения является использование в качестве активной среды световодов, легированных висмутом, имеющих широкие полосы усиления в ближней ИК области спектра. На сегодняшний день на основе висмутовых активных световодов разработано большое количество лазерных устройств для спектрального диапазоне 1150–1750 нм [1, 2]. При исследовании волоконных усилителей и суперлюминесцентных волоконных источников (СВИ) [3] было обнаружено, что степень поляризации выходного сигнала СВИ зависит от состояния поляризации излучения накачки, а коэффициент усиления – от взаимного расположения направлений поляризации сигнального излучения и излучения накачки. Эти данные свидетельствуют о том, что сечения поглощения и люминесценции висмутовых активных центров не изотропны. Эффект поляризационно-зависимого усиления излучения довольно хорошо изучен в световодах, легированных редкоземельными элементами [4]. Большое число работ посвящено изучению поляризованной люминесценции [5] в объемных стеклах, легированных ионами Pr^{3+} , Nd^{3+} , Eu^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} [6–8]. В то же время анизотропия поглощения и излучения активных центров в стеклах и световодах, легированных висмутом, все еще детально не исследована.

2. Объект исследования и методика эксперимента

Образцы представляли собой заготовки активных висмутовых световодов, изготовленных по MCVD-техно-

гии. Оболочка состояла из чистого кварцевого стекла, а сердцевина – из германосиликатного стекла, легированного ионами висмута. Диаметр заготовок составлял ~ 12 мм, диаметр сердцевины – 2 мм. Типичный профиль показателя преломления исследуемых образцов представлен на рис. 1, а. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки Δn составляла $(7-9) \times 10^{-3}$. Концентрация Вi во всех образцах была менее 0.1 мас. %, поскольку эффективное усиление и лазерная генерация наблюдаются только в

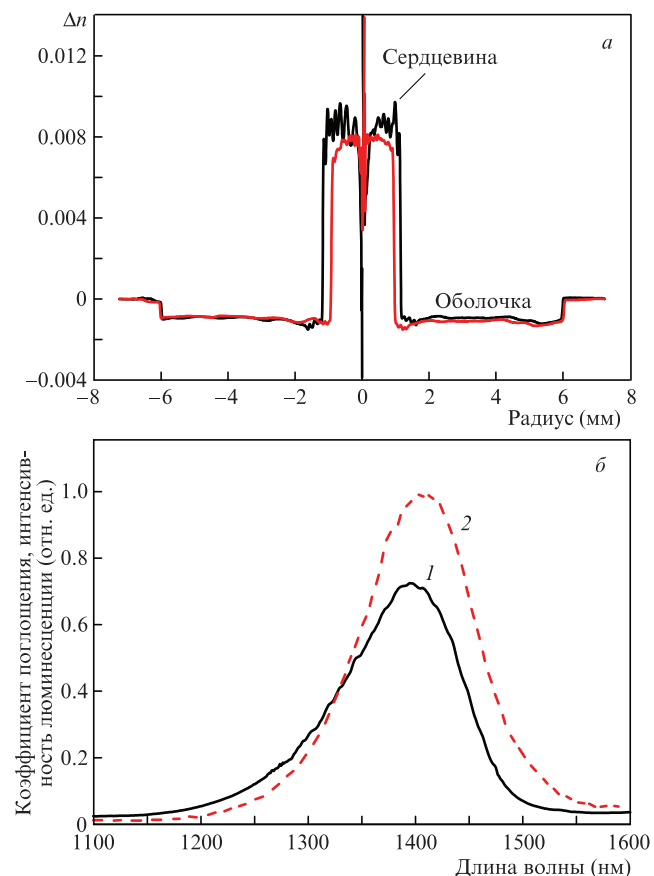


Рис. 1. Типичные профили показателя преломления исследуемых образцов (а) и спектры поглощения (1) и люминесценции (2) ВАЦ (б).

К.Е.Рюмкин, С.В.Фирстов, А.М.Хегай, А.В.Харахордин, С.В.Алышев, М.А.Мелькумов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: 3bc@mail.ru

Поступила в редакцию 27 марта 2019 г., после доработки – 11 февраля 2020 г.

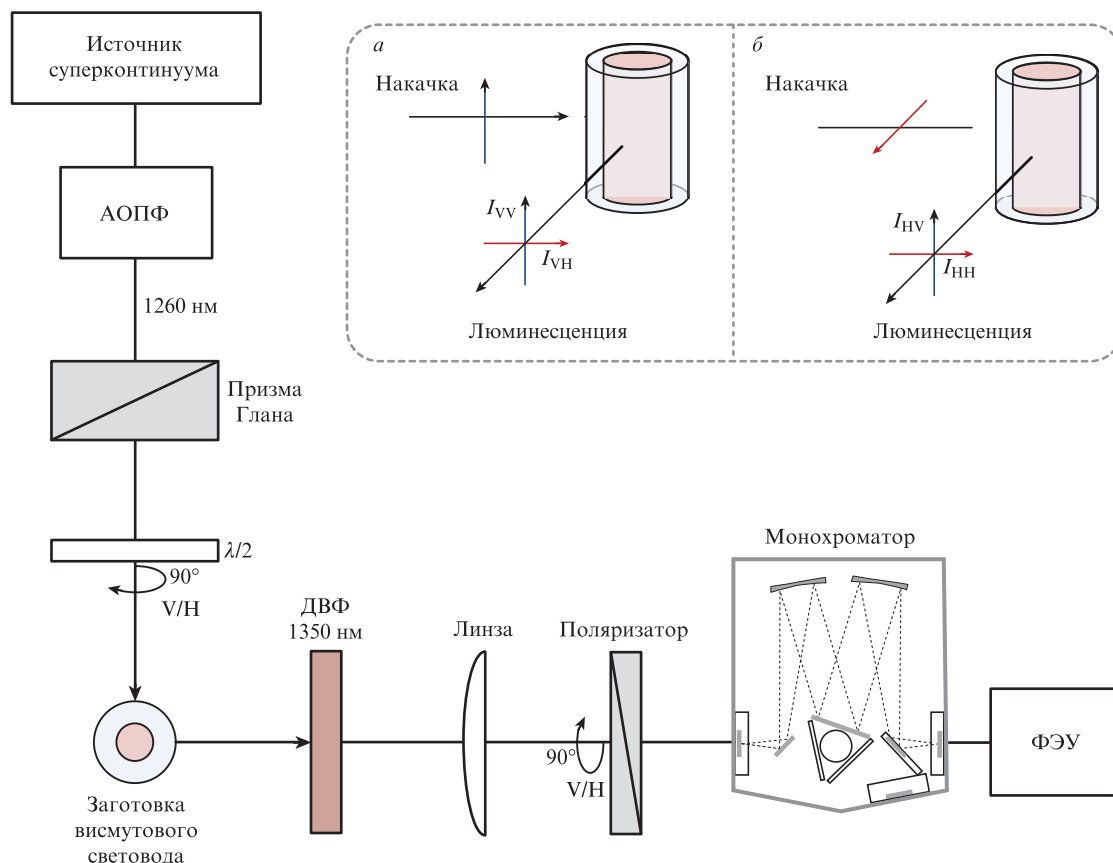


Рис.2. Схема экспериментальной установки (ДВФ – длинноволновой фильтр).

волоконных световодах с низкой концентрацией висмута. Типичные спектры поглощения и люминесценции висмутовых активных центров (ВАЦ) представлены на рис.1,б. В настоящей работе центры возбуждались излучением на $\lambda = 1260$ нм, а люминесценция регистрировалась в диапазоне 1300 – 1600 нм.

Схема установки представлена на рис.2. Источником сигнала служил источник суперконтинуума Fianium FemtoPower 1060, генерирующий на выходе квазинепрерывное сверхширокополосное излучение в диапазоне 450–1800 нм со спектральной плотностью мощности ~ 1 мВт/нм. Источник суперконтинуума имеет волоконно-оптический выход с разъемом для подключения к акусто-оптическому перестраиваемому фильтру (АОПФ), который позволяет выделять из широкого спектра источника суперконтинуума одну или несколько линий в диапазоне 1100–1700 нм с шириной от 5 нм. В данном эксперименте использовалась длина волны 1260 нм, соответствующая полосе возбуждения ВАЦ в германосиликатных стеклах. На выходе АОПФ имеется узкий коллимированный пучок частично поляризованного излучения. Для выделения излучения с линейной поляризацией служила призма Глана Thorlabs GL10 из кальцита лазерного качества с экстинкцией не менее 100000:1 в диапазоне 350 – 2300 нм. Для поворота плоскости поляризации излучения накачки использовалась ахроматическая полуволновая пластина Thorlabs ANWP10M-1600, работающая в диапазоне 1100–2000 нм. Люминесценция образца фокусировалась на входную щель монохроматора плосковыпуклой линзой из кварцевого стекла. Передняя поверхность линзы находилась на расстоянии 70 мм от центра образца. Для подавления рассеянного излучения накачки между лин-

зой и образцом был установлен фильтр Thorlabs FEL1350 (ДВФ, рис.2), отсекающий излучение с длиной волны короче 1350 нм. Контроль поляризации люминесценции осуществлялся с помощью поляризатора Thorlabs LPIREA050-C с коэффициентом экстинкции более 1000:1 в диапазоне рабочих длин волн 1050–1700 нм. В схеме использовался монохроматор симметричного типа Черни–Тернера с нарезной решеткой (830 штрих./мм) с длиной волны блеска 1200 нм, оптимизированной для работы в диапазоне 500–1800 нм. Сигнал люминесценции детектировался фотоэлектронным умножителем Hamamatsu R5509-72 (300–1700 нм), который охлаждался жидким азотом.

Полуволновая пластина устанавливалась таким образом, чтобы плоскость поляризации возбуждающего излучения была направлена вертикально (рис.2, вставка а). Регистрировались интенсивности люминесценции образца I_{VV} и I_{VH} (первая буква обозначает плоскость поляризации излучения накачки, вторая – плоскость поляризации люминесценции (V – вертикальная, H – горизонтальная)) при двух положениях поляризатора, соответствующих пропускам вертикально и горизонтально поляризованных компонент люминесценции. Степень поляризации рассчитывалась по формуле $P = (I_{VV} - I_{VH}G) / (I_{VV} + I_{VH}G)^{-1}$. Некоторые компоненты схемы имеют различное пропускание для излучения с различными состояниями поляризации, поэтому в формуле используется поправочный коэффициент G , рассчитываемый путем измерения интенсивностей I_{HV} и I_{HH} . Поскольку при возбуждении люминесценции излучением, плоскость поляризации которого горизонтальна (рис.2, вставка б), интенсивности люминесценции с вертикальной и горизонтальной поляризациями равны, то отношение их детектируемых

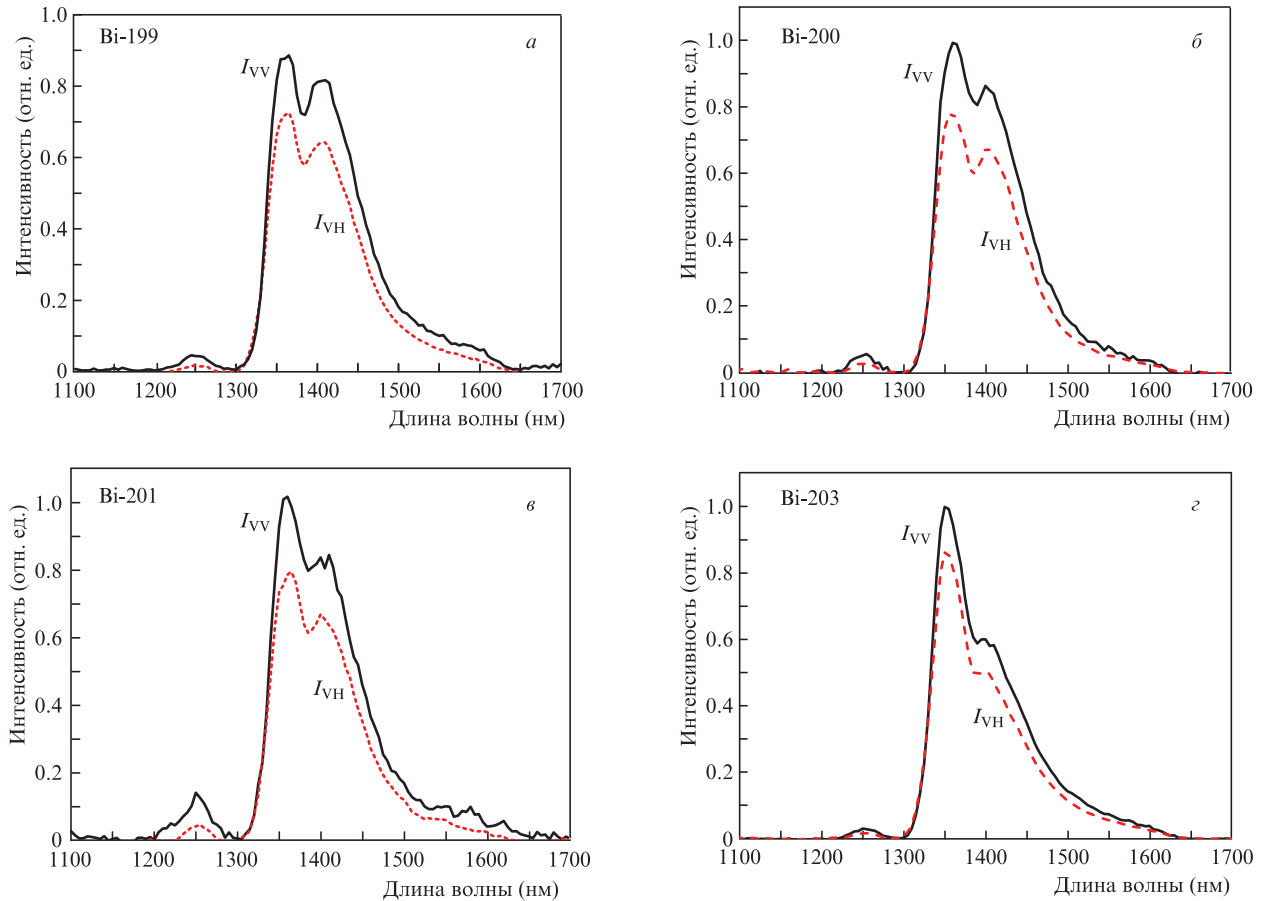


Рис.3. Спектры поляризованной люминесценции ВАЦ при возбуждении на $\lambda = 1260$ нм в образце Bi-119 (а), Bi-200 (б), Bi-201 (в), Bi-203 (г).

(после прохождения системы) интенсивностей дает поляризационную селективность системы $G = I_{HV}/I_{HH}$. Этот коэффициент практически совпадает с коэффициентом экстинкции решетки монохроматора и составляет от 2.25 до 2.7 в диапазоне $\lambda = 1.35-1.45$ мкм.

Для проверки корректности работы экспериментальной установки и определения точности измерений с её помощью использовались образцы стекол, активированных ионами Er^{3+} , с известной степенью поляризации люминесценции. Измерения показали, что в тестовых образцах степень поляризации не превышает 1%, что совпадает с экспериментальными данными, представленными в [7]. Таким образом, погрешность измерений степени поляризации люминесценции с использованием нашей установки находится в пределах 1%.

3. Результаты измерений

Спектры поляризованной люминесценции различных образцов заготовок висмутовых световодов представлены на рис.3. Пик в области $\lambda \sim 1.25$ мкм – это пик излучения накачки, частично проходящего через ДВФ, а основной пик люминесценции на 1.4 мкм имеет небольшой провал на $\lambda \approx 1.385$ мкм, связанный, вероятно, с наличием ОН-групп в линзах и фильтрах, установленных на пути распространения люминесценции.

Измерения показали, что при возбуждении образцов линейно поляризованным излучением с вертикальной поляризацией интенсивности люминесценции с вертикальной и горизонтальной поляризациями существенно раз-

личаются. В табл.1 для исследованных образцов приведены степени поляризации люминесценции и коэффициенты поглощения ВАЦ на $\lambda \approx 1.4$ мкм. Коэффициент поглощения ВАЦ служит мерой относительной концентрации активного висмута в сердцевине. Он измерялся в световодах, вытянутых из исследуемых заготовок, т.к. это значительно проще и точнее, чем измерения потерь в самих заготовках. Предполагается, что вытяжка заготовки не приводит к значимой трансформации ВАЦ.

Представленные данные свидетельствуют о том, что сечения поглощения и люминесценции висмутовых активных центров пространственно не изотропны. Степень поляризации люминесценции ВАЦ в германосиликатных стеклах на порядок выше, чем стекол, активированных ионами Er^{3+} . Из полученных результатов следует, что в световодах с германосиликатной сердцевиной, легированной висмутом, поляризационно-зависимое усиление должно иметь примерно на порядок большее значение, чем в световодах, легированных Er . В связи с этим при проектировании и реализации устройств на основе висмутовых

Табл.1. Спектральные характеристики ВАЦ на $\lambda \approx 1.4$ мкм.

Образец	Коэффициент поглощения (дБ/м)	Степень поляризации
Bi-199	2.2	0.12
Bi-200	1.65	0.12
Bi-201	1.4	0.12
Bi-202	18	0.09
Bi-203	4	0.09

световодов требуется уделять повышенное внимание поляризационным зависимостям, включая степени и состояния поляризации сигнального излучения и излучения накачки. Исходя из этого в нашей следующей работе планируется измерение поляризационно-зависимого усиления в висмутовом германосиликатном световоде, сохраняющем поляризацию.

Стоит отметить, что, как видно из табл.1, в эксперименте по мере роста концентрации ВАЦ наблюдается небольшое уменьшение степени поляризации люминесценции, что может указывать на наличие безызлучательной передачи возбуждения между активными центрами в случае повышенной концентрации ВАЦ. При таком процессе будет происходить «потеря информации» о состоянии поляризации возбуждающего излучения, а наблюдаемая в эксперименте степень поляризации излучения люминесценции будет снижаться. Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что в исследованном диапазоне концентраций доля ВАЦ, обменивающихся энергией, невелика. Передача энергии между ВАЦ с помощью фотонов практически исключена из-за малости оптической толщины исследуемых образцов (не более 0.0045 мм).

Таким образом, нами исследована поляризованная люминесценция висмутовых активных центров в германосиликатных стеклах. Обнаружена частичная поляриза-

ция люминесценции вблизи $\lambda = 1.4$ мкм при возбуждении линейно поляризованным излучением на $\lambda = 1.26$ мкм. Степень поляризации достигает ~ 0.12 . Увеличение концентрации висмутовых активных центров в исследованном диапазоне приводит к незначительному снижению степени поляризации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-32-00927 (К.Е.Рюмкин) и программы Президиума РАН №13 (С.В.Фирстов, А.М.Хегай, А.В.Харакордин, С.В.Алышев, М.А.Мелькумов).

1. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Riumkin K.E., Shubin A.V., Khopin, V.F., Dianov E.M. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, **20**, 111 (2014).
2. Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Khagai A.M., Kharkhordin A.V., Melkumov M.A., Dianov E.M. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, **24**, 1 (2018).
3. Riumkin K.E., Melkumov M.A., Bufetov I.A., Shubin A.V., Firstov S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **37**, 4817 (2012).
4. Mazurczyk V.J., Zyskind J.L. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6**, 616 (1994).
5. Феофилов П.П. *Поляризованная люминесценция атомов, молекул и кристаллов* (М.: ГИФМЛ, 1959).
6. Kushida T., Takushi E., Oka Y. *J. Lumin.*, **12**, 723 (1976).
7. Rokhmin A., Aseev V., Nikonorov N. *Opt. Mater.*, **41**, 136 (2015).
8. Lebedev V.P., Przhetskii A.K. *Sov. Phys., Solid State*, **19**, 8 (1977).