

### Список литературы

1. Стороженко, П.А. Нанодисперсные порошки: методы получения и способы практического применения / П.А. Стороженко, Ш.Л. Гусейнов, С.И. Малашин // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т.4, № 1-2. – С.27-39.
2. Шабанова, Н.А. Химия и технология нанодисперсных оксидов: учебное пособие / Н.А. Шабанова, В.В. Попов, П.Д. Саркисов. – М.: Академкнига, 2006. – 309 с.
3. Glossary of Nanotechnology and related term // Terminology for nanomaterials. – London: BSI. – 2007.
4. Иванов, В.В. Нанопорошки нужны и востребованы современным рынком / В.В. Иванов // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т.4, № 1-2. – С.22-26.
5. Kudina, E.F. Modification of Alkali Silicate Solutions by Organic Reagents and Investigation of the Properties of the Final Products / E.F. Kudina, Yu.M. Pleskachevskii // Glass Physics and Chemistry. – 2009. – Vol. 35, No.4. – Pp. 442-448.

## ПРОЗРАЧНЫЕ ЭРБИЕВЫЕ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Варакса Ю. А., Синицын Г. В., Ходасевич М. А.

*Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Беларусь, m.khodasevich@ifanbel.bas-net.by*

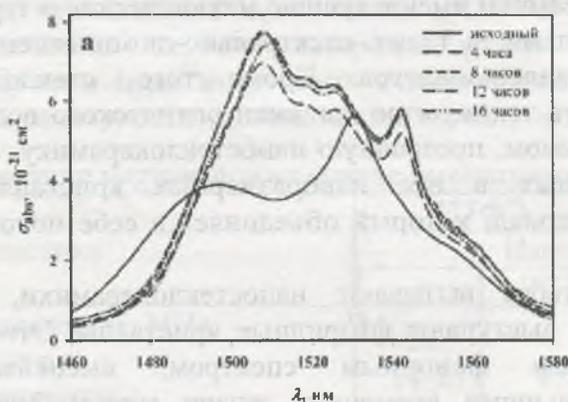
Быстрый рост всемирной коммуникационной сети стимулирует развитие оптических технологий передачи информации в волоконно-оптических системах со спектральным уплотнением каналов. Одними из образующих компонентов таких систем являются усилители на основе волокон, допированных ионами эрбия. Важное направление исследования таких усилителей связано с модификацией материала стеклянной матрицы, который обуславливает штарковское уширение спектра усиления за счет влияния окружения редкоземельных ионов. Для получения широких контуров усиления и повышения технологичности процесса изготовления активного волокна предложено использовать прозрачную стеклокерамику, в которой активатор находится в кристаллической фазе. Стеклокерамику получают при помощи вторичной термообработки стекла, которая позволяет варьировать как объемную долю кристаллической фазы, так и размер кристаллов. Необходимым условием применения стеклокерамики в качестве активной среды волоконных усилителей и лазеров является ее оптическая прозрачность. Для этого размеры кристаллов должны быть существенно меньше используемой длины волны света. Стеклокерамики имеют лучшие механические и термические характеристики по сравнению со стеклами, а также спектрально-люминесцентные свойства, близкие к свойствам монокристаллов-аналогов. Кроме того, стеклокерамические материалы позволяют использовать технологию вытяжки оптического волокна, неприменимую для кристаллов. Таким образом, прозрачную наностеклокерамику, состоящую из стеклянной матрицы и включенных в нее наноразмерных кристаллических частиц, можно рассматривать как материал, который объединяет в себе положительные свойства двух сред.

Наибольший интерес вызывают наностеклокерамики, в которых в качестве кристаллической фазы выступают фторидные кристаллы. Это связано с тем, что они характеризуются узким фононным спектром, высоким квантовым выходом люминесценции и большими временами жизни метастабильных состояний. Первой исследованной в данной работе стеклокерамикой является фторидная стеклокерамика  $30\text{SiO}_2\text{-}18\text{PbF}_2\text{-}15\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}5\text{ZnF}_2\text{-}29\text{CdF}_2\text{-}(3\text{-}x)\text{YF}_3\text{-}x\text{ErF}_3$  [1]. Образование нанокристаллов фторида свинца и переход ионов эрбия в кристаллическую фазу в таких стеклокерамиках

достигались с помощью вторичной термообработки стекла. Главная задача такой обработки – создать относительно большую объемную долю наноразмерных кристаллов. В формировании кристаллической фазы важную роль играют ионы эрбия. Было установлено, что термообработка при температуре 475 °С исходного стекла, не содержащего эрбий, не приводит к образованию кристаллической фазы. Введение эрбия меняет характер кристаллизации стекла и приводит к росту кристаллической фазы, которая не зависит от концентрации активатора. Увеличение времени термообработки ведет к увеличению размеров нанокристаллов (при двухчасовой термообработке размер кристаллов составлял ~160 Å, а при десятичасовой ~ 400 Å). Небольшие размеры кристаллов обуславливают невысокий уровень светорассеяния в гетерофазной стеклокерамике.

На рис. 1 представлены спектры измеренного сечения поглощения лазерного перехода  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  иона эрбия и рассчитанного по методу МакКамбера [2] сечения испускания исходного стекла и стеклокерамик с концентрацией  $\text{Er}^{3+}$  0,5 мол% и разными временами вторичной термообработки. Видно, что у стеклокерамик выше пиковое значение и полуширина спектра сечения испускания. Как следствие, у стеклокерамик лучше и один из широко применяемых критериев качества активной среды – произведение пикового значения и полуширины спектра сечения испускания. Однако время жизни метастабильного уровня в стеклокерамике увеличивается только при низкой концентрации  $\text{Er}^{3+}$  (0,5 мол%: стекло – 6,6 мс, стеклокерамика – 6,7–7,0 мс). Для образцов с высокой концентрацией активатора наблюдается обратная зависимость (1 мол%: стекло – 7,3 мс, стеклокерамика – 4,4–4,6 мс; 3 мол%: стекло – 4,3 мс, стеклокерамика – 0,8–1,0 мс). Другим видом исследуемых стеклокерамик являются фторокисные стеклокерамики ( $44,5\text{SiO}_2\text{-}24,8\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}5\text{CaO}\text{-}9,9\text{NaF}\text{-}14,8\text{CaF}_2$ ), в которых в качестве кристаллической фазы выступают кристаллы  $\text{CaF}_2$  [3]. Образцы с одинаковым уровнем допирования эрбием ( $2,4 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$ ) и разными температурами вторичной термообработки (от 600 до 650 °С) продемонстрировали сравнительно плоские спектры сечений усиления в полосе 1530–1565 нм при инверсии населенностей от 0,7 до 1 и рост времени жизни метастабильного уровня с 5,9 до 8,0 мс при увеличении температуры отжига.

Для корректного сравнения активных сред для волоконно-оптических усилителей в [4] нами было предложено использовать в качестве критерия сравнения активных сред предельную спектральную эффективность передачи информации в режиме ненасыщенного усиления при накачке по квазидвухуровневой схеме. Следует отметить, что, поскольку предельная спектральная эффективность представляет собой пропускную способность в единичной полосе частот, результат сравнения зависит от выбранной длины волны сигнала. Этот выбор в известной мере произволен. Кроме того, спектральная эффективность не учитывает широкополосность спектра усиления.



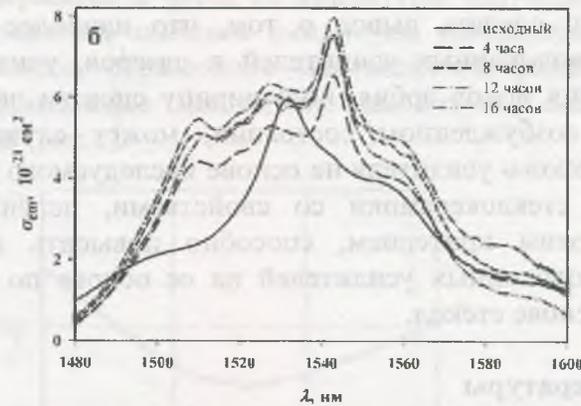


Рисунок 1 – Спектры сечений поглощения (а) и испускания (б) перехода между уровнями  ${}^4I_{13/2}$  и  ${}^4I_{15/2}$  ионов  $Er^{3+}$  для исходного образца (сплошные кривые) и стеклокерамик при разных продолжительностях вторичной термообработки и концентрации  $Er^{3+}$  0,5 мол%.

Поэтому более адекватным критерием является пропускная способность волоконного усилителя [5] — максимальная скорость, с которой информация может быть безошибочно передана со входа усилителя на его выход.

На основе экспериментальных зависимостей времени жизни люминесценции ионов эрбия, сечений поглощения и испускания нами было проведено численное моделирование работы эрбиевых усилителей в режиме ненасыщенного усиления для исходного стекла и стеклокерамик, характеризующихся различными условиями вторичной термообработки и различными концентрациями ионов эрбия. При этом длины усилителей подобраны таким образом, чтобы общее количество ионов эрбия было одинаковыми для всех исследуемых образцов одного типа. В результате моделирования были определены спектральные и предельные информационные характеристики эрбиевых волоконных усилителей на основе исследуемых стекол и стеклокерамик. На рис. 2 представлены пропускные способности волоконных усилителей на основе свинцово-фторидных стекол и стеклокерамик и кальциево-фторокисных стекол и стеклокерамик. Видно, что устройства из свинцово-фторидных стеклокерамик уступают по предельным информационным характеристикам устройствам из стекла, а усилители из кальциево-фторокисных стеклокерамик с температурами отжига 600 и 630 С превосходят усилитель из соответствующего стекла.

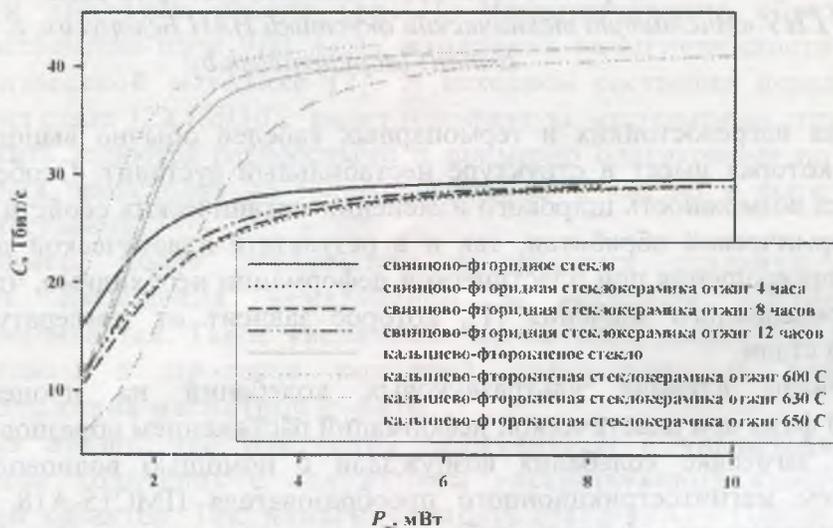


Рисунок 2 – Пропускная способность эрбиевых усилителей на основе свинцово-фторидных стекол и стеклокерамик (0,5 мол%) (черные линии) и кальциево-фторокисного исходного стекла и стеклокерамик (серые линии) в зависимости от мощности накачки.

Итак, можно сделать вывод о том, что наиболее полным критерием качества активной среды волоконных усилителей и лазеров, учитывающим пиковую величину сечения испускания ионов эрбия, полуширину спектра люминесценции и время жизни ионов эрбия в возбужденном состоянии, может служить пропускная способность волоконно-оптического усилителя на основе исследуемого материала. В работе показано, что применение стеклокерамики со свойствами, целенаправленно подобранными в соответствии с этим критерием, способно повысить предельные информационные характеристики волоконных усилителей на ее основе по сравнению с традиционными усилителями на основе стекол.

### Список литературы

1. Спектрально-люминесцентные и информационные характеристики прозрачных свинцово-фторидных наностеклокерамик, активированных ионами эрбия / В. А. Асеев [и др.] // *Опт. и спектр.* – 2010. – Т. 108. – С. 763–770.
2. McCumber, D.E. Theory of photon-terminated optical masers / D. E. McCumber // *Phys. Rev.* – 1964. – Vol. 134. – P. A299-A306.
3. Improvement of  $\text{Er}^{3+}$  emissions in oxyfluoride glass ceramic nano-composite by thermal treatment / Daqin Chen [et al.] // *Journal of Solid State Chemistry.* – 2006. – Vol. 179. – P. 1445-1452.
4. Ходасевич, М.А. Стекла для эрбиевых волоконных усилителей: сравнение на основе предельной спектральной эффективности передачи информации / М. А. Ходасевич, Г. В. Синицын, Ю. А. Варакса // *Опт. и спектр.* – 2006. – Т. 101. – С. 805–809.
5. Varaksa, Yu.A. Transmission Capacity of Erbium-Doped Fiber Amplifiers as a Criterion for Quality of Erbium-Doped Optical Fibers / Yu. A. Varaksa, G. V. Sinitsyn, M. A. Khodasevich // *Optics and Spectroscopy.* – 2008. – Vol. 104, № 1. – P. 130–134.

## СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ОБОЛОЧКИ КОМПОЗИЦИОННОГО КАБЕЛЯ ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Царенко Ю.В., Рубаник В.В., Бобров В.П.

ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск

E-mail: labpt@vitebsk.by

Оболочка нагревостойких и термодарных кабелей обычно выполняется из стали 12Х18Н10Т, которая имеет в структуре нестабильный аустенит. Особенностью данной стали является возможность широкого изменения механических свойств как в результате различной термической обработки, так и в результате пластической деформации. Для начала  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращения при пластической деформации необходимо, чтобы напряжение достигло определенного значения [1], которое зависит от температуры деформации нержавеющей стали.

Исследовано влияние ультразвуковых колебаний на процесс образования мартенситной фазы при пластической деформации растяжением образцов кабеля КНМСС. В кабельной заготовке колебания возбуждали с помощью волноводной системы с использованием магнитострикционного преобразователя ПМС15-А18. Для получения информации о количестве  $\alpha'$ -фазы в кабеле в зависимости от условий деформации (рис.1) были проведены рентгеноструктурные исследования. Исследования проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.