

## СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОКЕРАМИКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОКРИСТАЛЛЫ $\text{Er:PbF}_2$

Скопцов Н.А.<sup>1</sup>, Юмашев К.В.<sup>1</sup>, Захаревич Г.Б.<sup>2</sup>, Рачковская Г.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЦ Оптических материалов и технологий, БНТУ, Минск, Республика Беларусь,

<sup>2</sup> Белорусский государственный технологический университет, Минск Республика Беларусь

Оксифторидные стекла, легированные трехвалентными ионами эрбия ( $\text{Er}^{3+}$ ), привлекают внимание как перспективный материал для преобразования оптического излучения ближнего ИК диапазона в видимую область спектра, поскольку обладают интенсивной зеленой и красной ап-конверсионной люминесценцией [1-3]. Их оптические свойства могут быть улучшены термообработкой, которая приводит к выделению наноразмерной кристаллической фазы [2]. В настоящей работе представлено исследование спектроскопических свойств стеклокерамики, содержащей нанокристаллы  $\text{Er:PbF}_2$ .

Исходное стекло системы  $\text{SiO}_2\text{-PbF}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$ , содержащее  $4.4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ , было синтезировано при температуре  $900 \pm 50 \text{ C}$ . Выдержка при максимальной температуре осуществлялась в течение 30 минут. Расплавленное стекло отливало на стальную плиту, после чего подвергалось отжигу в муфельной печи при температуре  $\sim 250 \text{ C}$  в течение 2 часов. Далее стекло охлаждалось до комнатной температуры. Полученное стекло прозрачно и имеет слабый розовый оттенок. Рентгенофазовый анализ (РФА) показал, что исходное стекло имеет аморфное состояние. Стеклокерамика получается из исходного стекла термообработкой при температуре  $350 \text{ C}$  в течение 40 часов. Из РФА установлено (рисунок 1), что в исходном стекле выделяется кристаллическая фаза  $\text{PbF}_2$ , нанометрового размера.

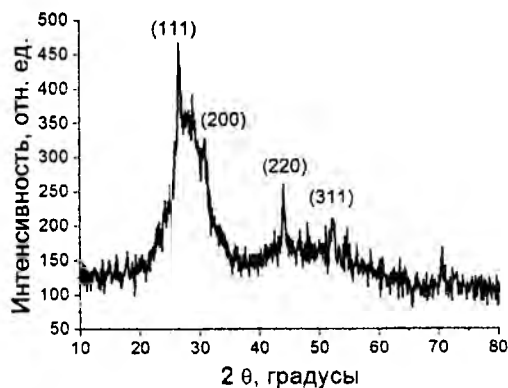


Рисунок 1 – РФА стеклокерамики, содержащей нанокристаллы  $\text{Er:PbF}_2$

Регистрация спектров поглощения образцов стекол и стеклокерамик осуществлялась спектрофотометром Cary Varian 5000. Спектры люминесценции измерены методом синхронного

детектирования. Люминесценция в образцах возбуждалась излучением диодного лазера с длиной волны  $962 \text{ нм}$ . Для регистрации спектров

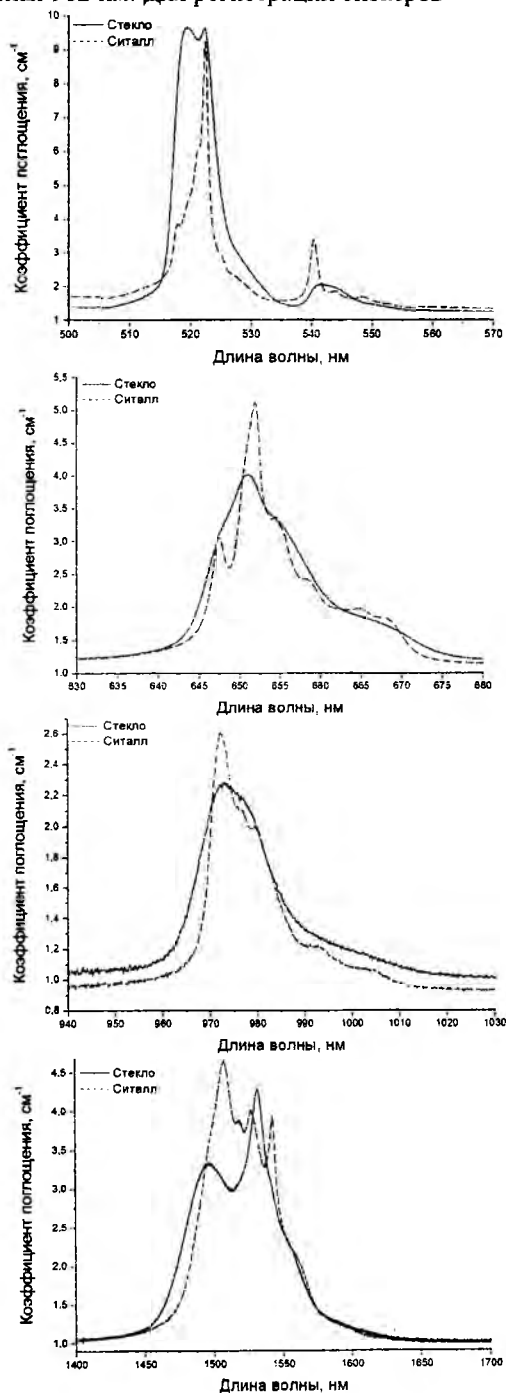


Рисунок 2 – Спектр поглощения иона  $\text{Er}^{3+}$  в стекле (сплошная линия) и в ситалле (штриховая линия)

люминесценции в спектральном диапазоне 500–700 нм использовался фотоприемник Hamamatsu C5460-01, в области 1400-1700 нм применялся фотоприемник Hamamatsu G 5851-11.

Время жизни ионов эрбия в состоянии  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4I_{13/2}$  определено из моделирования кривых затухания и разгорания люминесценции на длине волны 1540 нм. При измерении кинетики люминесценции возбуждение осуществлялось лазерным излучением с длиной волны 972 нм и длительностью отдельного импульса 25 нс. Регистрация люминесценции осуществлялась фотодетектором Hamamatsu G 5851-11. Зависимость интенсивности сигнала от времени регистрировалась цифровым осциллографом Textronix TDS-3000B.

Полосы поглощения исследуемых материалов (рисунок 2) соответствуют переходам из основного  ${}^4I_{15/2}$  в возбужденные состояния  ${}^4I_{13/2}$  (1540 нм),  ${}^4I_{11/2}$  (970 нм),  ${}^4F_{9/2}$  (650 нм),  ${}^4S_{3/2}$  (540 нм) и  ${}^2H_{11/2}$  (520 нм) иона  $Er^{3+}$ . Выделение кристаллической фазы приводит к изменению спектров поглощения иона  $Er^{3+}$ . Ионы эрбия входят в состав кристаллической фазы со структурой  $Er_xPb_{1-x}F_{2+x}$ . На длине волны 972 нм коэффициент поглощения достигает значения  $1,5 \text{ см}^{-1}$ , полуширина на полувысоте составляет 12,6 нм.

На рисунке 3 представлен спектр люминесценции в видимой области спектра. Наблюдаемые линии соответствуют переходам  ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  и  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  иона  $Er^{3+}$ .

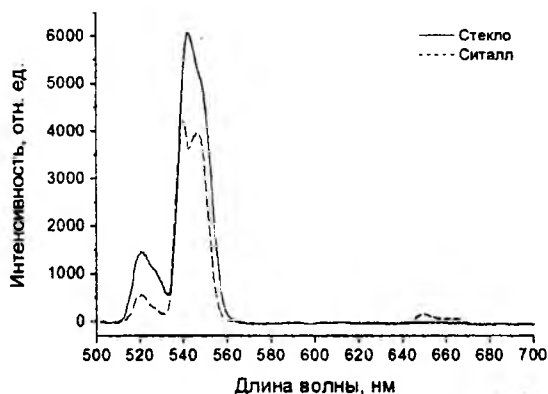


Рисунок 3 – Спектр люминесценции иона  $Er^{3+}$  в стекле (сплошная) и в ситалле (штриховая линия)

Кривая затухания люминесценции ионов эрбия представлена на рисунке 4. Затухание носит моноэкспоненциальный характер. Из результатов моделирования экспериментальных данных было установлено время жизни иона эрбия в состоянии  ${}^4I_{13/2}$  составляет 2,9 мс в стекле и 0,12 мс в стеклокерамике.

Разгорание люминесценции (рисунок 5) позволяет определить время жизни ионов эрбия в состоянии  ${}^4I_{11/2}$ , которое составляет в стекле 30 мкс, а в ситалле – 10 мкс.

В нанокристалле эрбий оказывается под воздействием окружающего кристаллического поля, которое приводит к искажению спектров поглощения и люминесценции, изменяет время жизни ионов в возбужденном состоянии.

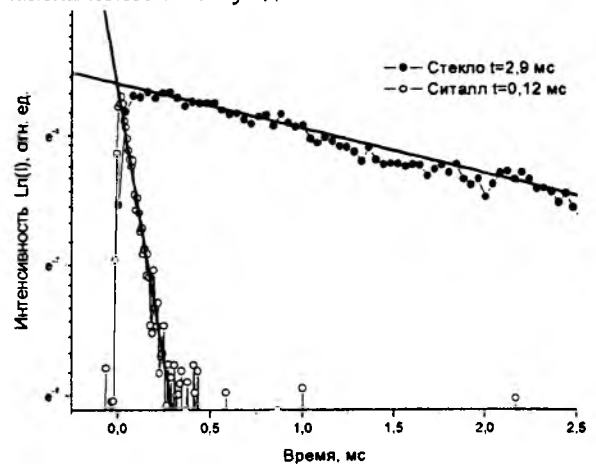


Рисунок 4 – Затухание люминесценции. Точки – экспериментальные данные, линии – результат моделирования

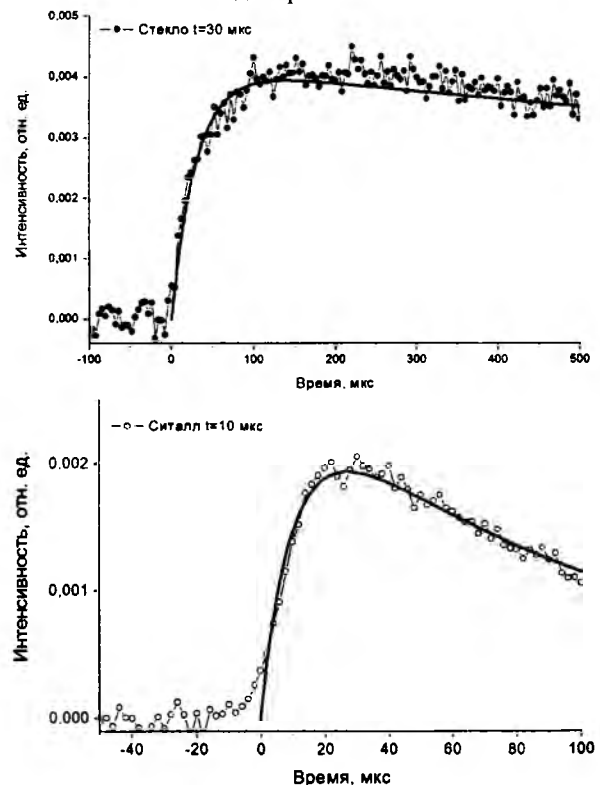


Рисунок 5 – Разгорание люминесценции. Точки – экспериментальные данные, линии – результат моделирования

Таким образом, синтезирована прозрачная стеклокерамика, содержащая нанокристаллы  $Er:PbF_2$ . Установлено, что синтезированный материал обладает люминесценцией в видимой области спектра при ИК возбуждении. Определены времена жизни иона эрбия в состоянии  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4I_{13/2}$  в стекле и стеклокерамике.

1. Takahashi, M. / M. Takahashi, M. Izuki, R. Kanno, Y. Kawamoto // J Appl. Phys. 83, 3920 (1998).
2. Dantelle, G. / G. Dantelle, M. Mortier, G. Patriarche, D. Vivien // J Solid State Chem. 179, 1995 (2006).
3. Qiao, X. / X. Qiao, X. Fan, M. Wang, Z. Zhang // Opt. Mater. 27, 597 (2004).

УДК 681

## СТЕГАНОГРАФИЯ В ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДАХ

Слипенчук П.В.

Московский государственный университет им. Н.Э.Баумана  
Москва, Российская Федерация

Стеганография – это искусство и наука передавать сообщения различными способами так, чтобы не было обнаружено наличие самого сообщения. Стеганография может быть применима для реализации трёх целей: скрытой передачи данных (СПД), цифровых отпечатков (ЦО) и стеганографических водяных знаков (СВЗ)[12].

В данной работе мы будем использовать следующие основные определения из области стеганографии (см [1]):

**Сообщение**(или *стегосообщение*) – передаваемая (или хранимая) скрытая информация.

**Контейнер** – любая информация, используемая для сокрытия сообщения.

**Пустой контейнер** – контейнер, не содержащий сообщения.

**Заполненный контейнер** (стегоконтейнер) – контейнер, содержащий сообщение.

**Ключ** (стегоключ) – секретный параметр, необходимый для сокрытия сообщения в контейнере.

**Стеганографический канал** (стегоканал) – канал передачи стегоконтейнера.

Под **стеганографической системой** (стегосистемой) мы будем подразумевать программную, аппаратную или программно-аппаратную систему, пригодную для организации скрытого канала передачи информации. Аналогично криптографическому принципу Кирхгофа, будем считать, что третья сторона точно знает алгоритм работы стеганографической системы. Неизвестным для третьей стороны остаётся только секретный ключ(стегоключ), с помощью которого можно узнать о факте существования и о содержании сообщения.

Таким образом, при проектировании стеганографической системы надо руководствоваться следующими принципами:

а) без знания стегоключа, третьей стороне должно быть затруднительно даже установить факт существования сообщения;

б) при обнаружении противником наличия скрытого сообщения он не должен иметь

возможности извлечь сообщение до тех пор, пока не будет владеть ключом.

Задача стегоанализа сводится к следующим подзадачам: обнаружение факта наличия сообщения и извлечение сообщения из заполненного контейнера.

**Общая модель стеганографии в помехоустойчивых кодах.** В общем случае есть блок, состоящий из букв какого-либо алфавита (например из  $\{0,1\}$ ). Размеры блока  $n$  на  $m$ . С помощью помехоустойчивого кода  $A$  мы преобразуем блок размера  $n$  на  $m$  в блок, размера  $n+n_1$  на  $m+m_1$ (см. рис. 1) В частном случае  $m=m_1=1$ .

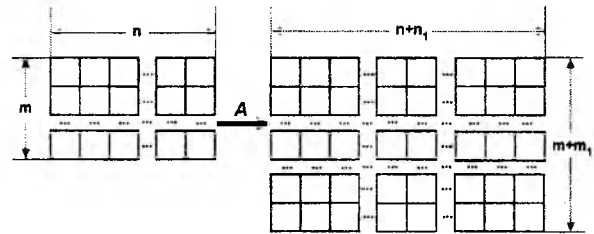


Рисунок 1

Блок, подаваемый на вход алгоритма, будем называть **информационной матрицей**[10], а выход алгоритма  $A$  будем называть **кодовой матрицей**[10]. Код исправляющий ошибки может быть создан для исправления одиночных и/или пакетных ошибок. Кодовая матрица подаётся в канал с шумом, принимается второй стороной и декодируется в исходную информационную матрицу.

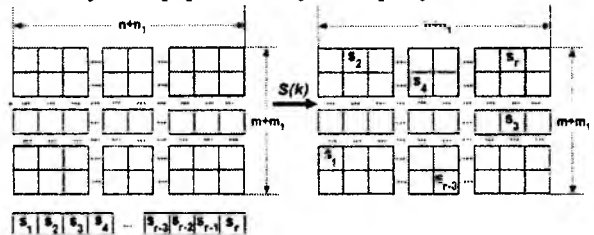


Рисунок 2

Предположим, что нам известно распределение ошибок в канале. Анализируя данное конкретное распределение, можно построить алгоритм  $S$ , зависящий в общем случае