

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 535.37

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ ИОНОВ
ЭРБИЯ НА МЕТАСТАБИЛЬНОМ УРОВНЕ В АКТИВНОМ
ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ¹

©2026 г. А. М. Симонов^{a,b,*}, А. С. Вахрушев^{a,b}, В. Д. Степанова^b,
И. С. Азанова^{a,b}

^a Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский просп., 29

^b ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»
Россия, 614002, Пермь, ул. 25 Октября, 106

*E-mail: simonovAM@pnppk.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 05.05.2026

Принята к публикации 22.06.2026

Представлены результаты исследования факторов, влияющих на время жизни ионов эрбия на метастабильном уровне $^4I_{13/2}$ в активных оптических волокнах. Продemonстрировано снижение времени жизни ионов эрбия для со-легированных Ce^{3+} активных оптических волокон. Установлена линейная зависимость с отрицательным наклоном между временем жизни и коэффициентом поглощения на длине волны накачки. Доказано, что тепломеханические режимы изготовления волокна (жакетирование, масштабирование заготовки) и метод внедрения эрбия в преформу (методы хелатной доставки или пропитки) не оказывают статистически значимого влияния на исследуемый параметр. Полученные результаты позволяют разделить технологические параметры на критические и некритические, что важно для разработки воспроизводимой технологии активных волокон с заданными спектроскопическими характеристиками.

Ключевые слова: активное оптическое волокно, ионы эрбия, метастабильный уровень, время жизни люминесценции.

1. ВВЕДЕНИЕ

Активные оптические волокна, легированные ионами эрбия (Er^{3+}), являются ключевым элементом волоконных лазеров и усилителей, работающих в диапазоне 1.5–1.6 мкм. Эффективность таких устройств в значительной степени определяется временем

¹ Международная конференция «Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026», Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

жизни метастабильного уровня ${}^4I_{13/2}$, которое влияет на пороговые характеристики, эффективность накачки и энергетический потенциал [1].

Оптические свойства ионов Er^{3+} сильно зависят от локального окружения в матрице стекла. Варьирование состава матрицы сердцевины активного оптического волокна позволяет изменять время жизни метастабильного уровня и форму спектра усиления, что делает выбор матрицы одним из ключевых факторов при разработке активных волокон [2]. Кроме того, важным аспектом является взаимосвязь времени жизни с коэффициентом поглощения на длине волны накачки (980 нм), которая, несмотря на теоретические соотношения Эйнштейна, в реальных стеклах требует дополнительного экспериментального изучения из-за влияния безызлучательных процессов [3].

Наряду с химическим составом, важную роль играет технология изготовления активных волокон. Основными методами изготовления являются MCVD в сочетании с растворным легированием (solution doping) или хелатной доставкой эрбия [4]. В литературе активно обсуждается влияние химического состава, однако систематических работ, посвященных влиянию тепломеханических воздействий на этапе изготовления преформы и заготовки на время жизни метастабильного уровня, недостаточно [4].

В настоящей работе проведен систематический анализ факторов, влияющих на время жизни ионов эрбия на метастабильном уровне ${}^4I_{13/2}$. Установлено, что определяющее влияние на время жизни оказывает состав матрицы сердцевины стекла, в то время как тепломеханические режимы изготовления заготовки не вносят значимого вклада. Показано наличие линейной зависимости с отрицательным наклоном между временем жизни и коэффициентом поглощения на длине волны накачки. Доказано, что метод внедрения эрбия в преформу (хелатная доставка или пропитка) не является критическим фактором, определяющим люминесцентные характеристики метастабильного уровня.

2. ЛИТЕРАТУРНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Ион эрбия Er^{3+} является одним из наиболее широко используемых активаторов в волоконных лазерах и усилителях, работающих в диапазоне длин волн 1.5–1.6 мкм. Интерес к этому иону обусловлен наличием оптического перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, энергия которого соответствует минимуму оптических потерь в стандартном кварцевом оптическом волокне [5]. Энергетическая диаграмма иона Er^{3+} в стеклянной матрице характеризуется расщеплением уровней под действием кристаллического поля (эффект Штарка), что приводит к уширению спектральных линий, характерному для аморфных сред [5]. Для возбуждения ионов Er^{3+} на метастабильный уровень ${}^4I_{13/2}$ наиболее часто используется

накачка на длине волны 980 нм, соответствующая переходу $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ (рис. 1). С уровня $^4I_{11/2}$ за счет быстрой безызлучательной многофононной релаксации (с характерным временем порядка нескольких микросекунд) ионы переходят на метастабильный уровень $^4I_{13/2}$ [6]. Время жизни на этом уровне существенно больше (несколько единиц миллисекунд), что обусловлено малым энергетическим зазором до расположенного ниже уровня $^4I_{15/2}$ [7].

Рис. 1. Упрощенная схема уровней расщепления ионов эрбия Er^{3+}

Источники оптического излучения на основе активных оптических волокон, легированных эрбием, нашли широкое применение не только в обычных условиях эксплуатации, но и при повышенном ионизирующем излучении: в условиях космоса, в атомной промышленности и военной технике. Для подавления радиационных эффектов в состав активной сердцевины вводятся со-легирующие добавки, среди которых наиболее эффективным является церий Ce^{3+} [8]. В то же время внедрение церия может оказывать влияние на люминесцентно-кинетические характеристики активной среды, что необходимо учитывать при проектировании генерационных систем. С физической точки зрения ионы Ce^{3+} вводят дополнительные каналы релаксации энергии для ионов Er^{3+} . Наиболее значимым является процесс резонансной передачи энергии с уровня $^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} на уровень $^2F_{5/2}$ иона Ce^{3+} с последующей быстрой безызлучательной релаксацией на основной уровень [9]. Этот канал ускоряет заселение рабочего метастабильного уровня $^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} , что в целом благоприятно сказывается на эффективности накачки. Однако при высоких концентрациях церия возможно также тушение люминесценции и с самого уровня $^4I_{13/2}$. Как показано в работах [10] на примере кристаллов BaY_2F_8 , легированных Er^{3+} и Ce^{3+} , добавление 4% церия приводит к уменьшению времени жизни уровня $^4I_{13/2}$ с 15.6 мс до 10 мс. Таким образом, при разработке радиационно-стойких активных волокон необходимо искать компромисс: концентрация церия должна быть достаточной для обеспечения требуемой радиационной стойкости, но не настолько высокой, чтобы критически снизить время жизни метастабильного уровня и ухудшить генерационные параметры [8].

Состав стеклянной матрицы и локальное окружение ионов Er^{3+} также влияют на время жизни ионов эрбия на метастабильном уровне. Различные матрицы стекла сердцевины активных оптических волокон (алюмосиликатные, германосиликатные, фосфоросиликатные и т.п.) характеризуются разными значениями максимальной энергии фононов, что влияет на вероятность многофононной релаксации. В фосфатных матрицах сердцевины стекла максимальная энергия фононов выше (около 1300 см^{-1}), чем в силикатных (примерно 1100 см^{-1}). Поэтому многофононная релаксация с уровня $^4I_{11/2}$ в фосфатных стеклах

происходит эффективнее, что при умеренных концентрациях фосфора снижает порог генерации излучения и повышает эффективность накачки системы [11]. Особое внимание стоит обратить именно на концентрацию ионов активаторов. При увеличении концентрации ионов Er^{3+} время жизни люминесценции, как правило, уменьшается. Основными механизмами, приводящими к снижению времени жизни ионов эрбия на метастабильном уровне $^4I_{13/2}$, выступают концентрационное тушение (кластеризация) и ап-конверсия [12].

Концентрационное тушение – “кластеризация”. Увеличение концентрации редкоземельных элементов в сердцевине приводит к тому, что ионы сближаются и начинают взаимодействовать друг с другом. Энергия возбуждения одного иона в паре (донора) безызлучательно передается соседнему иону (акцептору), который находится на основном уровне $^4I_{15/2}$ [13]. В результате донор теряет свои полезные свойства, не излучает фотон, а начинает обмениваться эффективной энергией с акцептором. Это приводит к снижению заселенности метастабильного уровня, а вследствие этого к снижению времени жизни ионов эрбия на метастабильном уровне $^4I_{13/2}$.

Ап-конверсия. При высокой концентрации эрбия и, соответственно, высоком значении коэффициента поглощения вероятность ап-конверсии резко возрастает. Этот процесс также происходит в результате взаимодействия двух-трех соседствующих ионов эрбия. Однако основное отличие заключается в том, что в этом процессе два-три соседних возбужденных иона взаимодействуют так, что один из них передает свою энергию другому. В результате один ион возвращается в основное состояние (безызлучательно), а второй переходит на еще более высокий энергетический уровень $^4H_{11/2}$, после чего релаксирует в основное состояние с излучением фотона с длиной волны примерно 540 нм [13]. Это не только гасит возбуждение одного иона, но и лишает энергии второй ион, который быстро релаксирует с верхнего уровня, минуя метастабильный, что значительно ускоряет опустошение метастабильного уровня $^4I_{13/2}$, следовательно, снижает время жизни иона в этом состоянии.

Активные оптические волокна, легированные ионами редкоземельных элементов, традиционно изготавливаются двумя основными методами: MCVD-технология + хелатная доставка редкоземельных элементов или пропитка (solution doping) [14]. В методе хелатной доставки осаждение лазерно-активной добавки происходит из газовой фазы. В методе пропитки пористый слой, полученный в процессе осаждения, пропитывается раствором, содержащим соли редкоземельных элементов, с последующей сушкой и остекловыванием [15]. С точки зрения кинетики люминесценции, ключевым вопросом является влияние технологических особенностей на время жизни ионов Er^{3+} на метастабильном уровне. Исследования показывают, что при условии одинаковой итоговой концентрации активатора

и сопоставимом локальном окружении ионов время жизни определяется преимущественно составом стеклянной матрицы и концентрацией примесей, но не деталями технологического процесса [16]. Отсутствие влияния технологии изготовления на время жизни объясняется тем, что как в методе хелатной доставки редкоземельных элементов, так и в методе пропитки финальная стадия формирования активной сердцевины связана с высокотемпературным остекловыванием, в процессе которого происходит перераспределение ионов активатора и устанавливается равновесное локальное окружение, определяемое химическим составом стекла, а не тепломеханическими операциями, производимыми над образцом [16]. Таким образом, оба технологических подхода при корректном исполнении позволяют получать материалы с сопоставимыми люминесцентно-кинетическими характеристиками.

Технологические параметры изготовления преформы и волокна также могут влиять на время жизни. В работе [4] исследовано влияние термической обработки и процесса вытяжки волокна на структуру матрицы и время жизни люминесценции в легированных эрбием и тулием кварцевых оптических волокнах. Показано, что термические циклы, необходимые для изготовления преформы (стадии консолидации и коллапса), могут влиять на распределение ионов активатора и образование дефектов, что, в свою очередь, сказывается на кинетике люминесценции. Важно отметить, что при корректном выборе режимов тепловой обработки эти эффекты могут быть минимизированы, и время жизни определяется преимущественно составом сердцевины и концентрацией активатора, а не деталями технологического процесса.

Таким образом, проведенный литературный обзор показывает, что время жизни ионов эрбия на метастабильном уровне в активные оптические волокна определяется комплексом взаимосвязанных факторов, ключевыми из которых являются концентрации активирующей примеси, т. е. самих ионов эрбия, состав стеклянной матрицы и концентрации примесных со-легирующих добавок (германия, алюминия, фосфора и т.д.), а также технологические параметры изготовления и тепломеханические воздействия на этапах изготовления активного оптического волокна. Отмечено, что технологии изготовления активных оптических волокон (хелатная доставка или пропитка) и тепломеханическое воздействие (жакетирование, масштабирование) не оказывают значимого влияния на время жизни ионов эрбия. Особое внимание уделено влиянию дополнительного со-легирования активных оптических волокон церием: с одной стороны, это легирование необходимо для обеспечения радиационной стойкости, с другой стороны, оно приводит к снижению времени жизни за счет появления дополнительных каналов безызлучательной релаксации ионов активаторов.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения времени жизни возбужденных состояний люминесцирующих центров в твердотельных средах существует несколько экспериментальных подходов [17, 18]. К наиболее распространенным относятся метод фазового сдвига (phase shift method), метод затухания люминесценции (time-resolved photoluminescence) [17] и метод модуляции добротности [18]. Метод фазового сдвига основан на измерении фазовой задержки между модулированным возбуждающим излучением и ответным люминесцентным сигналом, что позволяет определить время жизни по величине сдвига фаз. Метод модуляции накачки предполагает использование двух лазерных пучков – накачивающего и зондирующего – и измерение кинетики изменения поглощения или усиления. Метод затухания люминесценции основан на детектировании отклика активной среды на импульсное возбуждение и последующей математической обработке кривой затухания. Каждый из этих методов имеет свои ограничения: метод фазового сдвига эффективен для времен жизни от наносекунд до миллисекунд, но требует высокоточной аппаратуры; метод модуляции накачки дает высокую точность, однако сложен в практической реализации схемы детектирования. Преимуществами метода затухания люминесценции являются его относительная простота и наглядность: после прекращения короткого импульса накачки регистрируется спад интенсивности люминесценции во времени, после чего полученная кривая аппроксимируется экспоненциальной функцией [19]. Данный метод позволяет непосредственно наблюдать кинетику релаксации возбужденного состояния, не требует сложной обработки сигнала и дает надежные результаты для времен жизни в диапазоне от микросекунд до десятков миллисекунд, что делает его наиболее подходящим для исследования эрбий-легированных стеклянных матриц с характерными временами жизни порядка 5–15 мс.

В рамках настоящей работы за основу взят именно метод затухания люминесценции. Реализация методики измерения проводилась на основании интерпретации и синтеза информации, полученной из литературных источников [4, 10, 17, 18, 20]. Для исследования кинетики люминесценции ионов Er^{3+} на переходе ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ применяется возбуждение импульсным излучением на длине волны 980 нм, соответствующей интенсивной полосе поглощения Er^{3+} [20, 21]. Длительность возбуждающего импульса должна быть существенно меньше ожидаемого времени жизни (как правило, 1–2 мс при ожидаемом времени жизни 5–15 мс), чтобы обеспечить разрешение кинетики затухания [22]. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 2, где синими стрелками и черными сплошными линиями отмечены электрические и оптические связи соответственно.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения времени жизни ионов эрбия

Стоит отметить, что длина исследуемого образца составляла менее 5 см. Выбор малой длины волокна необходим для исключения вклада эффектов повторного поглощения люминесценции, усиленного спонтанного излучения и других нелинейных процессов, протекающих в активной среде [22]. К свободному концу исследуемого образца приваривалось бессердцевинное оптическое волокно, которое служило для безопасного вывода остаточной (непоглощенной) мощности накачки из измерительной схемы.

Кинетика затухания люминесценции после импульсного возбуждения описывается эволюцией населенности возбужденного уровня во времени. В простейшем случае, когда основным каналом дезактивации является спонтанное излучение, а влиянием межионных взаимодействий можно пренебречь (область малых концентраций легирующей примеси ионов эрбия), затухание люминесценции подчиняется экспоненциальному закону [4]:

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau}, \quad (1)$$

где $I(t)$ – интенсивность люминесценции в момент времени t , I_0 – начальная интенсивность, τ – время жизни возбужденного состояния на уровне ${}^4I_{13/2}$.

Обработка осциллограмм заключается в аппроксимации затухающего участка кривой экспоненциальной функцией. В случае, когда затухание не описывается одной экспонентой (что может наблюдаться при наличии нескольких типов люминесцирующих центров или при протекании кросс-релаксационных процессов), применяются модели с распределением времен жизни или растянутая экспонента [23].

4. ВЫБОР ОБРАЗЦОВ

В настоящей работе проведено комплексное исследование влияния различных факторов на время жизни ионов Er^{3+} в активных оптических волокнах отечественного производства. Отбор образцов осуществлялся в несколько этапов. На первом этапе отобраны образцы с различными значениями коэффициента поглощения на длине волны накачки 980 нм, что позволило охватить широкий диапазон концентраций ионов Er^{3+} и установить корреляцию между оптическими и кинетическими параметрами. На втором этапе в исследование включены образцы, изготовленные по разным технологиям внедрения редкоземельных элементов, – методом хелатной доставки и методом пропитки, что дало возможность оценить влияние технологии изготовления на итоговое время жизни. На третьем этапе проанализированы образцы активного оптического волокна, легированного эрбием, с со-легированием церием, что позволило выявить влияние радиационно-стойкой

добавки на люминесцентно-кинетические характеристики. В результате отобрано семь образцов, перечень которых с основными параметрами представлен в табл. 1. Такой многоступенчатый подход к отбору образцов обеспечивает комплексное понимание факторов, определяющих время жизни метастабильного уровня ионов Er^{3+} , и создает основу для оптимизации технологии изготовления активных волокон с заданными генерационными характеристиками.

Таблица 1. Перечень исследуемых образцов

Наименование образца	Матрица стекла сердцевины	Технология изготовления	Коэффициент поглощения на длине волны 980 нм, дБ/м	Диаметр оптического волокна по кварцевой оболочке, мкм
Образец 1	Er/Al/Ge	MCVD + хелаты	32.5	125.7
Образец 2		MCVD + хелаты	3.8	125.4
Образец 3		MCVD + хелаты	12.9	125.7
Образец 4		MCVD + пропитка	14.2	60.8
Образец 5		MCVD + пропитка	14.3	125.3
Образец 6	Ce/Er/Al/Ge	MCVD + пропитка	9.3	125.6
Образец 7		MCVD + пропитка	10.4	125.4

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В ходе экспериментальных исследований для всех семи образцов активного оптического волокна получены осциллограммы затухания люминесценции после импульсной накачки на длине волны 980 нм. Все зарегистрированные осциллограммы имеют качественно одинаковый вид: резкий рост интенсивности люминесценции в момент действия импульса накачки с последующим экспоненциальным спадом после его окончания. Поскольку форма кривых затухания для всех образцов принципиально не различается, а различие лишь в количественных параметрах спада, нет необходимости приводить осциллограммы для каждого из семи образцов. Достаточно детально рассмотреть один образец, чтобы продемонстрировать общий вид экспериментальных данных и методику их обработки.

На рис. 3 представлена типичная осциллограмма затухания люминесценции, полученная для образца 1. На рисунке продемонстрирован затухающий участок кривой, где проявляется экспоненциальный характер спада, что свидетельствует о выполнении экспоненциального закона затухания, описываемого уравнением (1). Аппроксимация затухающего участка методом наименьших квадратов позволяет определить значение времени жизни τ для данного образца. Стоит отметить, что коэффициент детерминации R^2

для всех образцов составляет не менее 0.99. Это указывает на пренебрежимо малый вклад эффектов концентрационного тушения и ап-конверсии в кинетику затухания люминесценции.

Рис. 3. Осциллограмма затухания люминесценции образца

Аналогичная обработка проведена для всех семи образцов, что позволяет получить набор значений времени жизни, систематизированных в зависимости от исследуемых параметров: коэффициента поглощения вблизи длины волны 980 нм, технологии изготовления (хелатная доставка или пропитка), а также наличия со-легирования церием. Результаты измерений сформированы в график и представлены на рис. 4. Погрешность определения времени жизни для всех образцов не превышает 1% и перекрывается размером маркеров (рис. 4).

Для количественного анализа взаимосвязи между оптическими и кинетическими параметрами исследованных образцов построена зависимость времени жизни τ от коэффициента поглощения α_{980} вблизи длины волны 980 нм. Полученные данные представлены на рис. 4. В первом приближении аппроксимация экспериментальных значений дает линейную зависимость с отрицательным наклоном $\tau = \tau_0 - k \alpha_{980}$, где τ_0 – экстраполированное время жизни при нулевой концентрации активатора, а k – коэффициент, характеризующий скорость тушения с ростом коэффициента поглощения. Коэффициент детерминации аппроксимации составил $R^2 = 0.88$. Применение более сложных видов аппроксимации (экспоненциальная, степенная и т.п.) не дает значительного прироста коэффициента детерминации, следовательно, для качественного анализа данных не несет большой ценности. Согласно литературным данным [24], ожидается обратная корреляция между концентрацией активатора (и, следовательно, коэффициентом поглощения) и временем жизни, однако линейный характер этой зависимости в явном виде ранее не был установлен для исследованного типа волокон. Таким образом, полученная линейная зависимость с отрицательным наклоном не только подтверждает известное качественное положение, но и дает количественную аппроксимацию, позволяющую прогнозировать время жизни по коэффициенту поглощения.

Рис. 4. Зависимость времени жизни ионов эрбия на метастабильном уровне от коэффициента поглощения вблизи длины волны 980 нм

Далее проведен анализ влияния тепломеханических воздействий на время жизни ионов Er^{3+} . Для этого сравнивались образцы, подвергшиеся различным тепломеханическим обработкам в процессе изготовления. При сравнении результатов установлено, что значения

времени жизни на метастабильном уровне для образцов 4 и 5, различающихся по степени тепломеханического воздействия, статистически неразличимы. Таким образом, тепломеханические воздействия не вносят дополнительных каналов безызлучательной релаксации и не оказывают значимого влияния на итоговое время жизни метастабильного уровня. В литературе [4] высказывались предположения о возможном влиянии термических циклов на распределение ионов активатора и образование дефектов, однако для исследованных режимов обработки это влияние не проявилось. Полученный результат расширяет имеющиеся представления, показывая, что при корректном выборе технологических параметров тепломеханические воздействия не являются критическим фактором, определяющим кинетику люминесценции.

Аналогичным образом оценена роль технологии изготовления активной сердцевины. Сравнение образцов 3 и 5, полученных методом хелатной доставки и методом пропитки (solution doping), соответственно, не выявило систематических различий в определенных временах жизни при сопоставимых коэффициентах поглощения. Как видно на рис. 4, точки, соответствующие разным технологиям, группируются в пределах одной корреляционной зависимости, что свидетельствует об отсутствии влияния способа внедрения редкоземельных металлов на кинетику люминесценции. Следовательно, оба технологических подхода при корректном исполнении позволяют получать материалы с идентичными люминесцентными характеристиками. Данный результат подтверждает результаты из работ [13, 25], согласно которым время жизни определяется преимущественно составом стеклянной матрицы и концентрацией примесей, но не деталями технологического процесса, и демонстрирует это на прямом сравнении образцов, изготовленных двумя методами в идентичных условиях.

Отдельное внимание в работе уделено исследованию образцов активного оптического волокна, со-легированных церием. Как показали измерения, наличие церия приводит к снижению времени жизни по сравнению с образцами без церия при сопоставимом коэффициенте поглощения (рис. 4). Для образцов, легированных Ce^{3+} , время жизни составило $\tau_{\text{Ce+Eg}} \approx 7.4$ мс, тогда как для аналогичных по концентрации эрбия образцов без церия мы имеем $\tau_{\text{Er}} \approx 9.1$ мс, что соответствует уменьшению более чем на 18%. Данный результат согласуется с известными литературными данными для кристаллических матриц [10], где добавление 4% церия приводило к уменьшению времени жизни уровня $^4I_{13/2}$ с 15.6 мс до 10 мс. Полученное в настоящей работе снижение времени жизни для кварцевых волокон подтверждает универсальность механизма тушения, связанного с резонансной передачей энергии между ионами Er^{3+} и Ce^{3+} [9]. В то же время, для исследованного типа волокон впервые количественно охарактеризовано влияние именно технологически

реализованного со-легирования церием на кинетику люминесценции, что важно для практического проектирования активных волокон. Полученные данные указывают на необходимость поиска компромисса при разработке таких волокон: концентрация церия должна быть достаточной для обеспечения применимости образцов [8], но не приводить к критическому снижению времени жизни, ухудшающему генерационные характеристики.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование факторов, определяющих время жизни ионов Er^{3+} на метастабильном уровне $^4I_{13/2}$ в активных оптических волокнах. На основе анализа семи образцов, различающихся по коэффициенту поглощения, технологии изготовления и наличию со-легирования церием, установлен ряд закономерностей.

Установлена линейная зависимость с отрицательным наклоном времени жизни от коэффициента поглощения вблизи длины волны 980 нм: $\tau = 9.77 - 0.07\alpha_{980}$, коэффициент детерминации составил $R^2 = 0.88$. Данный результат согласуется с известными литературными данными о концентрационном тушении люминесценции [24, 26], но он впервые представлен в виде количественной аппроксимации для исследованного типа волокон.

Продемонстрировано, что тепломеханические воздействия при жакетировании и масштабировании, а также выбор метода внедрения активных ионов (хелатная доставка или пропитка) не оказывают значимого влияния на время жизни ионов Er^{3+} . Эти результаты подтверждают и расширяют литературные данные [4, 16] о нечувствительности ключевых кинетических характеристик к данным технологическим факторам при корректном выборе режимов обработки. Достижение идентичных показателей времени жизни при различных подходах к легированию и обработке обеспечивает исключительную технологическую гибкость. Это позволяет производителю выбирать наиболее простой и экономически выгодный способ изготовления, исходя из доступных ресурсов, что дает возможность оптимизировать себестоимость волокна без затрат на перенастройку оборудования.

Для образцов, со-легированных церием, зафиксировано уменьшение времени жизни: $\tau_{\text{Ce+Er}} \approx 7.4$ мс, тогда как для образцов без церия при сопоставимом коэффициенте поглощения $\tau_{\text{Er}} \approx 9.1$ мс, что соответствует снижению более чем на 18%. Данный результат находится в качественном согласии с литературными данными для кристаллических матриц [10], где добавление 4% церия приводило к уменьшению времени жизни с 15.6 мс до 10 мс, и

подтверждает универсальность механизма тушения, связанного с резонансной передачей энергии между ионами Er^{3+} и Ce^{3+} [9].

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при разработке технологических регламентов изготовления активных оптических волокон с прогнозируемыми генерационными характеристиками, а также при проектировании волоконных лазеров и усилителей, где необходимо учитывать компромисс между стойкостью к воздействию мощного излучения (снижение уровня фотопотемнения) и сохранением высокого времени жизни метастабильного уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuroda K., Nakandakari M., Yoshikuni Y. Appl. Opt. 2018. V. 57. № 30. P. 8819. <https://doi.org/10.1364/AO.57.008819>
2. Barnes W.L., Laming R.I., Tarbox E.J., Morkel P.R. IEEE J. Quantum Electron. 1991. V. 27. № 4. P. 1004. <https://doi.org/10.1109/3.83335>
3. Kustov E.F., Loschenov V.B., Basieva I.T. Phys. Scr. 2014. V. 163. P. 014032 <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2014/T163/014032>
4. Vařák P., Kamrádek M., Aubrecht J. et al. Opt. Mater. Express. 2024. V. 14. № 4. P. 1048. <https://doi.org/10.1364/OME.520422>
5. Tanabe S. J. Non-Cryst. Solids. 1999. V. 259. № 1. P. 1. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(99\)00490-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(99)00490-1)
6. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology. Academic Press, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(00\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(00)00039-6)
7. Wysocki P.F., Digonnet M.J.F., Kim B.Y., Shaw H.J. J. Light. Technol. 1994. V. 12. № 3. P. 550. <https://doi.org/10.1109/50.285318>
8. Girard S., Vivona M., Laurent A., et al. Opt. Express. 2012. V. 20. № 8. P. 8457 <https://doi.org/10.1364/OE.20.008457>
9. Chen Z., Zhou K., Jiang C. Appl. Opt. 2010. V. 49. № 15. P. 2845. <https://doi.org/10.1364/AO.49.002845>
10. Sani E., Toncelli A., Tonelli, M. Opt. Express. 2005. V. 13. № 22. P. 8980. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.008980>
11. Xu S.-H., Yang Z.-M., Zhang Q.-Y., Deng Z.-D., Jiang Z.-H. Chin. Phys. Lett. 2006. V. 23. № 3. P. 633

12. Жеков В.И., Лобачев В.А., Мурина Т.М., Прохоров А.М. Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 1. С. 189.
[Zhekov V.I., Lobachev V.A., Murina T.M., Prokhorov A.M. Sov. Quantum Electron. 1984. V. 14. № 1. P. 128. <https://doi.org/10.1070/QE1984v014n01ABEH004657>]
13. Myslinski P., Nguyen .D., Chrostowski J. J. Light. Technol. 1997. V. 15. № 1. <https://doi.org/10.1109/50.552118>
14. Townsend J.E., Poole S.B., Payne D.N. Electron. Lett. 1987. V. 23. № 7. P. 329. <https://doi.org/10.1049/el:19870244>
15. Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers, Revised and Expanded. Ed. Michel J.F. Digonnet. CRC Press, 2001.
16. Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Кравцов К.С., Шубин А.В., Дианов Е.М. Квантовая электроника, 2004. Т. 34. № 9. С. 843. <https://www.mathnet.ru/rus/qe2688>
[Melkumov M.A., Bufetov I.A., Kravtsov K.S., Shubin A.V., Dianov E.M. Quantum Electron. 2004. V. 34. P. 843. <https://doi.org/10.1070/QE2004v034n09ABEH002688>.]
17. Brunel M., Vallet M., Bretenaker F. et al. Opt. Mater. 1996. V. 5. № 3.1996. P. 209. [https://doi.org/10.1016/0925-3467\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0925-3467(95)00060-7)
18. Айрапетян В.С., Ушаков О.К. Физика лазеров: учебное пособие. Новосибирск: СГГА, 2012.
19. Wang Q., Wen J., Luo Y., et al. Opt. Mater. Express. 2020. V. 10. № 2 P. 397. <https://doi.org/10.1364/OME.381237>
20. Denker B.I., Galagan B.I., Sverchkov S.E. Apl. Physi. B. 2015. V. 120. № 2. P. 367.
21. Pugliese D., Boetti N.G. b, Lousteau J. et al. J. Alloys Compd. 2016. V. 657. P. 678. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.126>
22. Алышев С.В. Волоконные световоды на основе кварцевого стекла, легированного висмутом или теллуром, лазерные среды для спектральной области 1550–1800 нм. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва: Ин-т общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 2016. 123 с.
23. Mauroy V. Élaboration de fibres optiques nanostructurées dopées aux ions de terres rares: influence des paramètres de fabrication sur la synthèse et la croissance des nanoparticules. Thèse de doctorat. Université Nice Sophia Antipolis, 2012.
24. Topper B., Wilke S.K., Pettes M. et al. Opt. Mater. Express. 2023. V. 13. № 10. P. 2857. <https://doi.org/10.1364/OME.503121>
25. DiGiovanni D.J. Fabrication of rare-earth-doped optical fiber. In: Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers. Ed. by M.J.F. Digonnet. CRC Press, 2001

26. *Henke B., Pientka F., Johnson J.A., Ahrens B., Miclea P.T. Schweizer S.* J. Phys.: Condens. Matter 2010. V. 22. P. 155107. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/15/155107>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Упрощенная схема уровней расщепления ионов эрбия Er^{3+}

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения времени жизни ионов эрбия

Рис. 3. Осциллограмма затухания люминесценции образца

Рис. 4. Зависимость времени жизни ионов эрбия на метастабильном уровне от коэффициента поглощения вблизи длины волны 980 нм

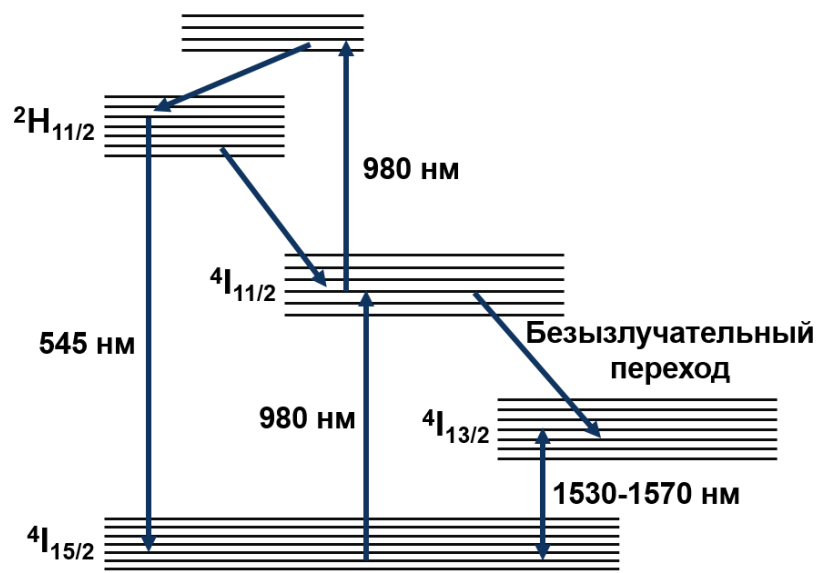


Рис. 1.

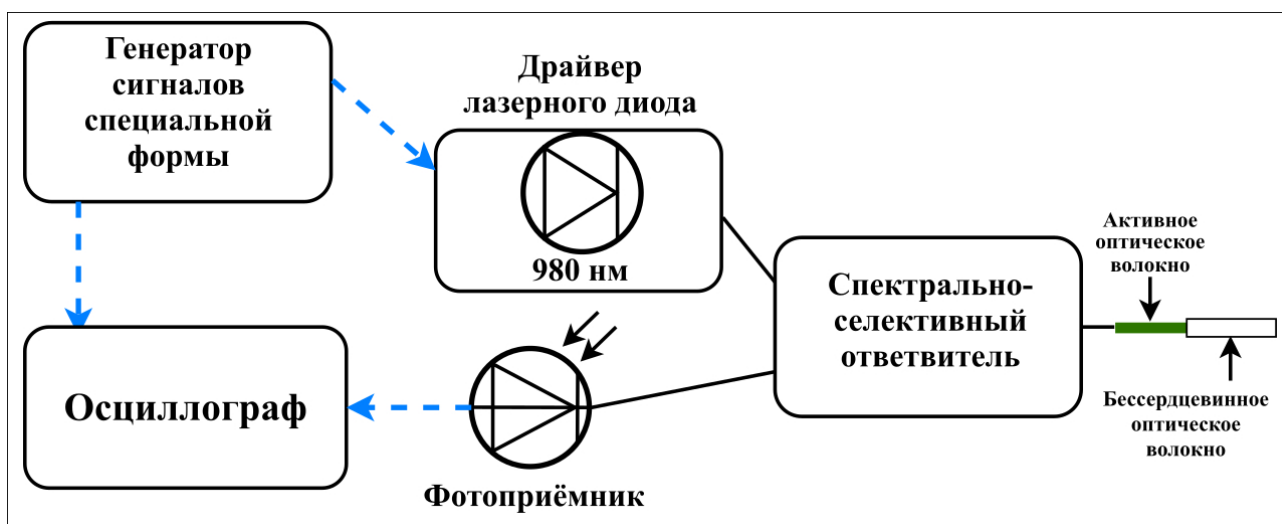


Рис. 2.

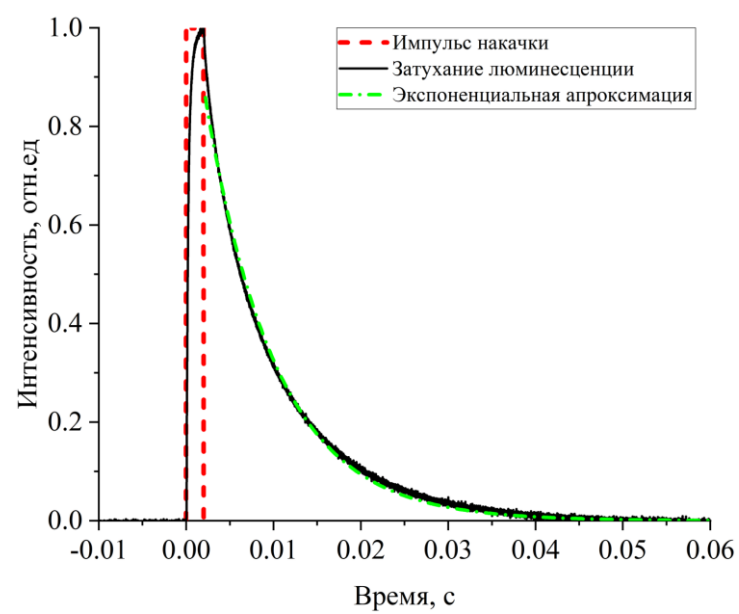


Рис. 3.

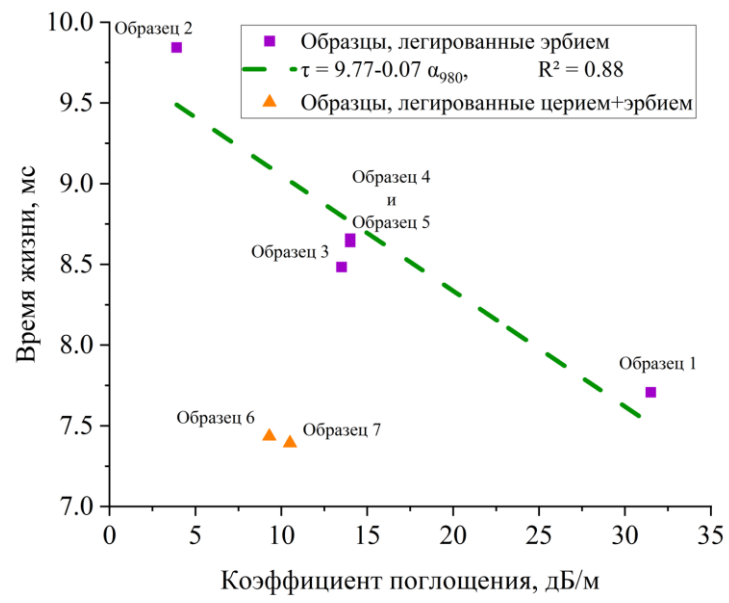


Рис. 4.