09,16

Наведенные электронным пучком центры окраски и фосфоресценции в прозрачной керамике на основе оксида иттрия с примесью циркония и иттербия

© В.И. Соломонов, А.С. Макарова, А.В. Спирина, В.В. Осипов, А.Н. Орлов, В.А. Шитов

Институт электрофизики Уральского отделения РАН,
Екатеринбург,Россия

E-mail: plasma@iep.uran.ru

Поступила в Редакцию 5 июня 2025 г.
В окончательной редакции 5 июня 2025 г.
Принята к публикации 26 июня 2025 г.

После облучения наносекундными (2 ns) пучками электронов со средней энергией 170 keV первоначально прозрачные бесцветные образцы керамики составов $Y_2O_3 + 5\,\text{mol.\%}\,ZrO_2$ и $Yb:Y_2O_3 + 5\,\text{mol.\%}\,ZrO_2$ окрашиваются, а в их спектрах пропускания появляется полоса поглощения при 487 nm, которая вместе с интенсивностью окраски возрастает с ростом числа импульсов облучения. После облучения окраска керамики самопроизвольно восстанавливается при комнатной температуре с постоянной времени порядка 80 h. Показано, что окрашивание керамики обусловлено центрами F-типа. Кроме того, в образцах состава $Yb:Y_2O_3 + 5\,\text{mol.\%}\,ZrO_2$ наблюдается фосфоресценция на широкой полосе 890–1200 nm, затухающая по гиперболическому закону с характерным временем порядка 10 s. Предложена модель механизмов окрашивания и обесцвечивания керамики.

Ключевые слова: кинетика светопропускания, нанопорошок, спектр пропускания, затухание люминесценции.

DOI: 10.61011/FTT.2025.06.60950.107-25

1. Введение

Керамика на основе оксида иттрия, активированного иттербием ($Yb:Y_2O_3$), является перспективным материалом для активных элементов мощных лазеров [1–3]. Ион-активатор Yb^{3+} имеет простую энергетическую структуру, состоящую из двух уровней: верхнего $^2F_{5/2}$ и нижнего $^2F_{7/2}$, расщепленных в кристаллическом поле на три и четыре штарковских компонентов соответственно. Лазерная генерация на длинах волн 1030 и 1074 nm возбуждается на оптических переходах с нижнего штарковского подуровня $^2F_{5/2}$ на верхние штарковские подуровни $^2F_{7/2}$. При керамической технологии изготовления активных элементов лазера на основе $Yb:Y_2O_3$ используются спекающие добавки, в частности, в виде гетеровалентных ионов циркония [4]. При внешнем высокоэнергетическом воздействии, например, при облучении электронами, на такую керамику возможно пространственное смещение или зарядовое изменение примесных ионов и их окружения. Это может привести к образованию новых наведенных дефектных структур, в т.ч. центров окраски и поглощения. В частности, в [5] с присутствием иона Yb^{2+} связывают потемнение алюмосиликатных световодов, легированных оксидом иттербия.

Целью работы является исследование кинетики светопропускания (прозрачности) и люминесценции керамики на основе Y_2O_3 с добавлением оксидов Yb_2O_3 и ZrO_2 в зависимости от количества импульсов облучения керамики пучками электронов со средней энергией 170 keV и плотностью энергии в пучке 44.2 mJ/cm^2.

2. Образцы и методы исследования

Исследовались образцы прозрачной керамики на основе оксида иттрия трех составов: $Yb_{0.1}Y_{1.9}O_3$ — первая группа, $Y_2O_3 + 5\,\text{mol.\%}\,ZrO_2$ — вторая группа и $Yb_{0.1}Y_{1.9}O_3 + 5\,\text{mol.\%}\,ZrO_2$ — третья группа. Для изготовления керамик были использованы нанопорошки соответствующего химического состава.

Нанопорошки были приготовлены методом испарения твердой пористой мишени излучением волоконного иттербиевого лазера [6]. Мишень готовилась из смеси коммерческих микроразмерных порошков оксидов иттрия, иттербия и циркония чистотой 99.99, 99.6 и 99.5%. Оксид иттербия содержанием 5 mol.% использовался как лазерно-активная примесь. Оксид циркония того же содержания в образцах второй и третьей группы использовался как спекающая добавка. После конденсации паров в воздухе образовывался порошок, основное содержание (98–99 %) которого представляли наночастицы соответствующего химического состава со средним размером около 15 nm. Остальное содержание (1–2 %) составляли частицы микронного и субмикронного размера.

Фазовый состав порошков измерялся на дифрактометре D8 Discover с графитовым монохроматором на диафрагмированном луче ($\lambda = 0.1542$ nm — $K_{\alpha 1,2}$ меди). Показано, что частицы кристаллизовались в мо-

Условия температурной обработки переделов нанопорошков, необходимых для синтеза оптических керамик

Группа	Химический состав	Обжиг компакта в воздухе	Спекание в вакууме	ГИП в аргоне	Просветляющий обжиг керамики в воздухе
1	$Yb_{0.1}Y_{1.9}O_3$	800 °C 3 h	1400 °C 1 h	1500 °C 2 h	1200 °C 10 h
2	$Y_2O_3 + 5\,\text{mol.\%}\,ZrO_2$	800 °C 3 h	1780 °C 20 h	–	1400 °C 2 h
3	$Yb_{0.1}Y_{1.9}O_3 + 5\,\text{mol.\%}\,ZrO_2$	900 °C 3 h	1750 °C 5 h	–	1400 °C 2 h

ноклинной фазе. После обжига на воздухе при температуре 900–1100 °C в течение 3 h частицы переходили в кубическую фазу. Данный режим фазовой трансформации сопровождался незначительной агломерацией наночастиц, о чем свидетельствовало уменьшение удельной поверхности частиц, измеренной методом Брунауэра–Эммета–Теллера. Вторых фаз в нанопорошках в пределах погрешности измерений не было обнаружено.

Полученные нанопорошки без добавления каких-либо органических связующих одноосным статическим прессованием под давлением 200 MPa компактировались в диски диаметром ~ 15 mm и толщиной 3–4 mm плотностью около 45% относительно теоретической плотности кристалла. Полученные компакты обжигались в атмосферной печи с целью снятия механических напряжений и удаления органических соединений. Образцы керамики первой группы были синтезированы с использованием методики горячего изостатического прессования (ГИП) на установке AIP HIP 6-30H (American Isostatic pressing, США) под давлением 200 MPa при предварительном спекании в вакуумной печи. Синтез керамик второй и третьей групп проводился в вакуумной печи с вольфрамовыми нагревателями при остаточном давлении $1 \cdot 10^{-3}$ Pa. Получение высокого вакуума обеспечивалось за счет использования связки спирального (ANEST IWATA, Япония) и турбомолекулярного (Shimadzu, Япония) насосов. Затем все образцы подвергались просветляющему обжигу на воздухе. В таблице представлены условия температурной обработки для переделов нанопорошка каждой группы.

Рентгенофазовый анализ показал, что кристаллическая структура керамики представляет собой твердый раствор примесных элементов (Yb, Zr) в кубической решетке оксида иттрия.

Облучение образцов керамики осуществлялось в установке КЛАВИ [7] на воздухе при комнатной температуре импульсными электронными пучками со средней энергией электронов 170 keV, плотностью электронного тока 130 A/cm^2 и плотностью энергии в импульсе 44.2 mJ/cm^2 при длительности 2 ns. Частота импульсов облучения составляла 1 Hz.

Спектры пропускания до и после облучения образцов керамики измерялись на спектрофотометре Shimatzu UV-1700 в диапазоне от 200 до 1100 nm.

Для регистрации фосфоресценции образцов после их облучения электронными пучками излучение с поверхности образца посредством кварцевого световода через механический модулятор направлялось на фотокатод ФЭУ. При этом с целью определения спектрального диапазона полосы фосфоресценции использовались ФЭУ-62 (рабочий диапазон 400–1200 nm) или ФЭУ-100 (200–800 nm), а также светофильтры. Сигналы с ФЭУ регистрировались с помощью микропроцессорного блока управления монохроматором МДР-41 при использовании программного обеспечения MdrWin.

Кинетика полосы излучения иона Yb^{3+} при 1030 nm регистрировалась фотоумножителем ФЭУ-62 и осциллографом KeySight DSOX 2014A (100 MHz) при облучении одиночными импульсами электронного пучка. Полоса выделялась монохроматором МДР-41 с входным фильтром 1.0–1.5 μm и дифракционной решеткой 1200 grooves/mm при ширине входной щели 2 mm (ширина регистрируемой области спектра составляла 5 nm).

3. Результаты исследований

До облучения импульсным электронным пучком все образцы керамики были бесцветными и прозрачными. После облучения образцы керамики первой группы ($Yb_{0.1}Y_{1.9}O_3$) оставались бесцветными, тогда как образцы керамики третьей группы ($Yb_{0.1}Y_{1.9}O_3 + 5\,\text{mol.\%}\,ZrO_2$) окрашивались в оранжево-розовый цвет (рис. 1). Их окрашивание также наблюдается при облучении ртутной бактерицидной лампой ($\lambda = 254$ nm). Образцы керамики второй группы $Y_2O_3 + 5\,\text{mol.\%}\,ZrO_2$ после облучения электронными пучками также окрашивались, но с меньшей насыщенностью цвета. Вследствие низкой цветопередачи фотоаппарата не удалось получить фотографию данных керамик с отчетливой границей облученной и необлученной половин образцов, поэтому она не приводится.

Спектры пропускания образцов керамики всех трех групп до и после облучения электронными пучками приведены на рис. 2. В образцах первой группы спектр

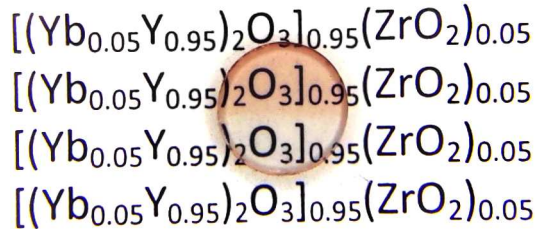

Рис. 1. Фотография образца керамики $Yb_{0.1}Y_{1.9}O_3 + 5\,\text{mol.\%}\,ZrO_2$, половина которого облучена 500 импульсными электронными пучками (верхняя), а вторая половина экранирована свинцовой пластиной (нижняя).

пропускания до и после облучения качественно не изменяется (рис. 2, *a*). В спектрах пропускания образцов первой и третьей групп наблюдаются сильные линии поглощения иона Yb^{3+} (рис. 2, *a* и *c*), а после облучения в спектрах пропускания образцов второй и третьей групп дополнительно появляется широкая полоса поглощения с максимумом при 487 nm (рис. 2, *b* и *c*), более сильная у образцов третьей группы (рис. 2, *c*). С увеличением числа импульсов облучения от 1 до 500 образцов третьей группы поглощение (оптическая плотность) в этой полосе нарастает (рис. 3, *a*), а после облучения падает по почти экспоненциальному закону с характерным временем обесцвечивания $\tau_{dc} \approx 80$ h (рис. 3, *b*).

В области 200–400 nm наблюдалось увеличение светопропускания облученных электронными пучками образцов третьей группы (рис. 2, *c*), при этом разность коэффициентов пропускания облученного и необлученного образца постепенно уменьшалась в течение 20 min после прекращения внешнего воздействия. По истечении этого времени спектр пропускания в УФ-области стал соответствовать спектру образца, не подвергнутому облучению (рис. 2, *c*, черная кривая). Просветление является ложным и происходит в результате инструментальных искажений, связанных с наличием в облученных образцах фосфоресценции в невидимой для глаза области спектра. В спектральном диапазоне чувствительности ФЭУ-100 не было зафиксировано свечения образцов, тогда как ФЭУ-62 устойчиво регистрировал их длительное послесвечение (рис. 4, *a*). Уточнить структуру этой полосы с помощью монохроматора нам не удалось из-за низкой спектральной плотности излучения. Однако использование светофильтров позволило сузить спектральный диапазон полосы фосфоресценции пределами 890–1200 nm. Ее затухание (рис. 4, *b*) с коэффициентами корреляции $R_2 = 0.99$ описывается как суммой двух экспонент типа

$$I_p = A\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + B\exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \qquad (1)$$

с характерными временами $\tau_1 \approx 10.4$ s и $\tau_2 \approx 145$ s (рис. 4, *b*, красные пунктирные прямые), так и гиперболическим законом

$$I(t) = I_0\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{-2} \qquad (2)$$

с $\tau \approx 10$ s (рис. 4, *b*, зеленая пунктирная прямая), где $I(t)$ и I_0 — текущая и начальная интенсивность фосфоресценции.

Для образцов третьей группы регистрировалась кинетика затухания импульсной катодолюминесценции на полосе 1030 nm, соответствующей лазерному переходу иона Yb^{3+}. Кривые затухания люминесценции снимались для каждого предварительно необлученного образца после 1-го, 10-го, 20-го, 30-го, ..., 200-го импульса облучения. Время между измерениями составляло около 1 min. Кривые затухания фототока I_p для всех образцов оказались подобными (рис. 5).

Все кривые затухания I_p образцов третьей группы после первого импульса облучения с коэффициентом корреляции $R_2 > 0.96$ описываются суммой двух экспонент (1) с характерными временами $\tau_1 = 70.2 \pm 5.1\,\mu$s и $\tau_2 = 1.64 \pm 0.08$ ms. (Здесь в качестве погрешности принят разброс этих величин по 9 измерениям — количеству образцов третьей группы). С возрастанием числа импульсов облучения до $N \approx 60$ длительная компонента τ_2 имеет тенденцию к снижению с 1.64 до 1.48 ms, но при $N \geq 60$ оба характерных времени сохраняют свои значения в пределах $\tau_1 = 70.0 \pm 4.4\,\mu$s и $\tau_2 = 1.51 \pm 0.07$ ms. Отношение коэффициентов A/B возрастает при увеличении N до 60, а при $N \geq 60$ сохраняет свое значение 6.2 ± 0.4.

При фотовозбуждении лазерным диодом с длиной волны 976 nm тех же образцов керамики кинетика этой полосы хорошо описывается одной экспоненциальной функцией с характерным временем, находящемся во временном диапазоне τ_2.

4. Обсуждение результатов

Во всех образцах керамики до облучения электронным пучком оптически активные центры не проявляются (рис. 2). Воздействие электронного пучка стимулирует перестройку дефектов и их оптическую активацию в керамике второй и третьей групп (с оксидом циркония в качестве спекающей добавки). Поэтому появляющаяся в этой керамике после облучения электронным пучком полоса поглощения при 487 nm опосредованно связана с наличием в ней четырехвалентных ионов Zr^{4+}. Сам ион Zr^{4+}, имеющий замкнутую электронную оболочку, является оптически неактивным в видимой области спектра. Трехвалентные ионы циркония, которые могут присутствовать или создаваться в керамике электронами пучка, должны проявляться в поглощении на $d \to d$-($E \to T_2$) переходах в более длинноволновой области 590–620 nm. В люминесценции трехвалентные ионы циркония в керамике оксида иттрия проявляются на полосах при $\lambda \approx 818$ и 900 nm [8].

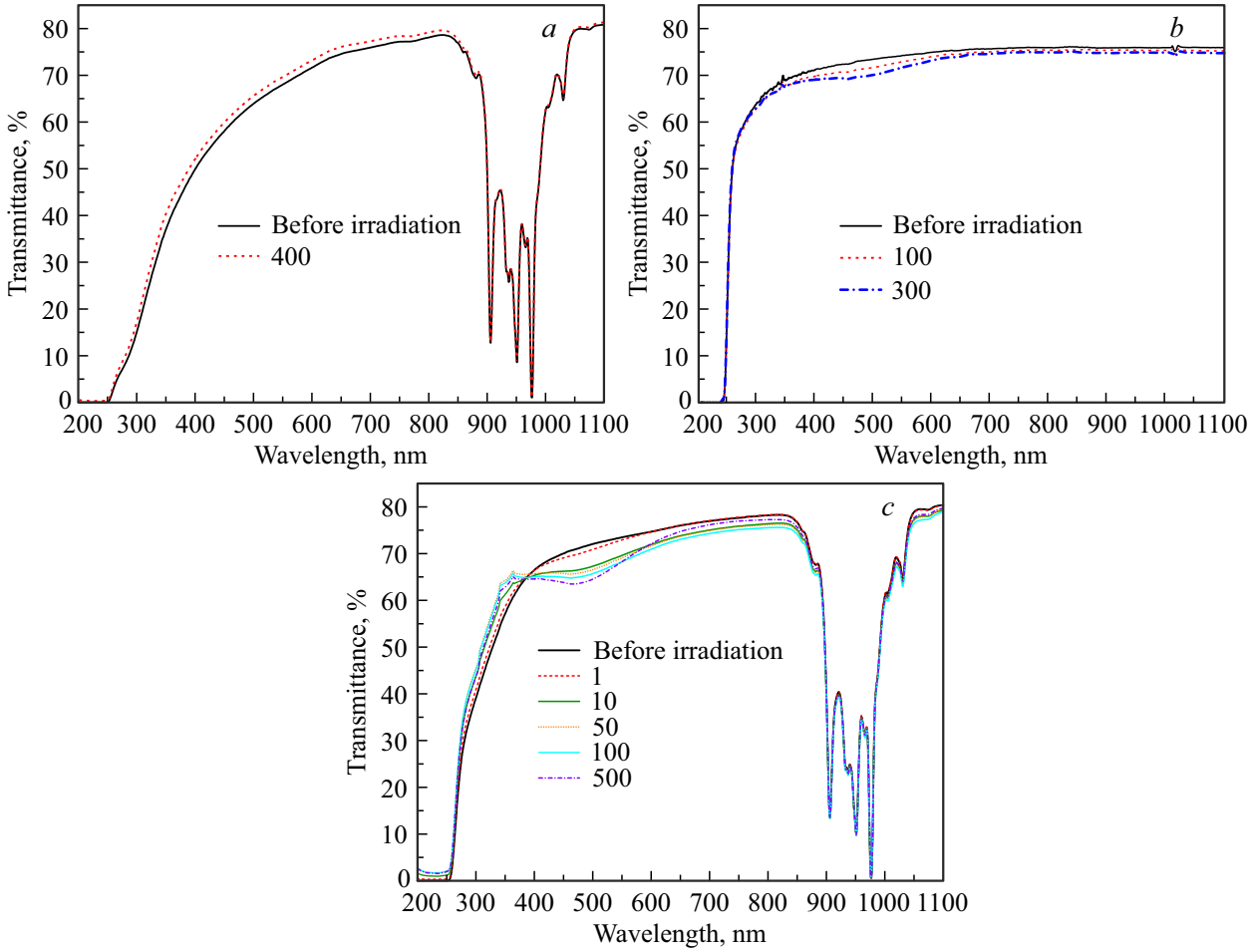

Рис. 2. Спектры пропускания образцов керамики *a*) первой, *b*) второй и *c*) третьей групп до и после облучения разным количеством (указано на рисунке) импульсов электронов.

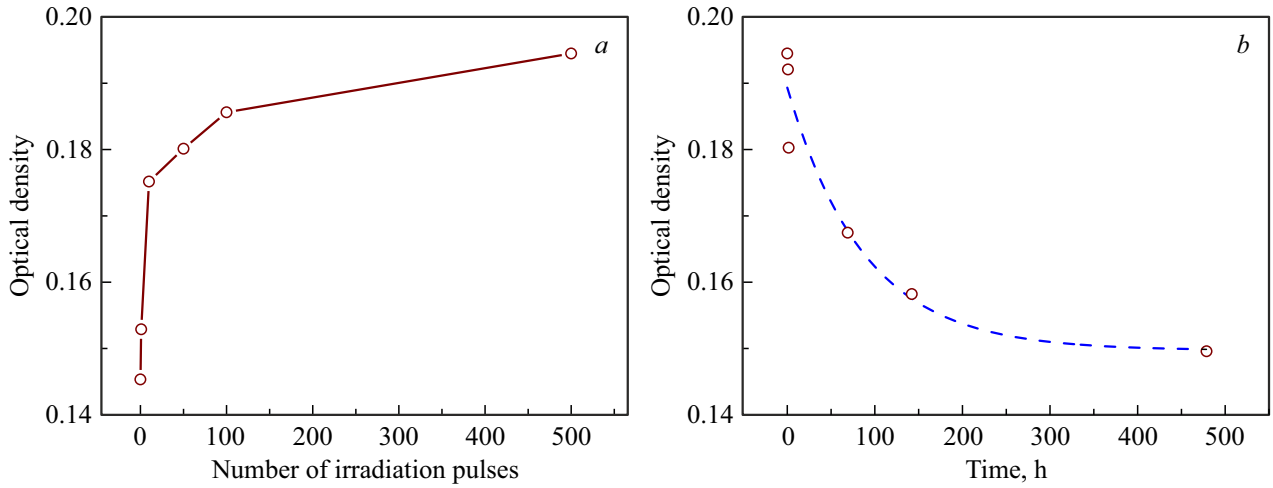

Рис. 3. Изменение оптической плотности в полосе поглощения при 487 nm образцов третьей группы с увеличением числа импульсов облучения электронным пучком (*a*) и со временем после облучения 500 импульсами (*b*). Синяя пунктирная кривая — результат аппроксимации экспоненциальной функцией.

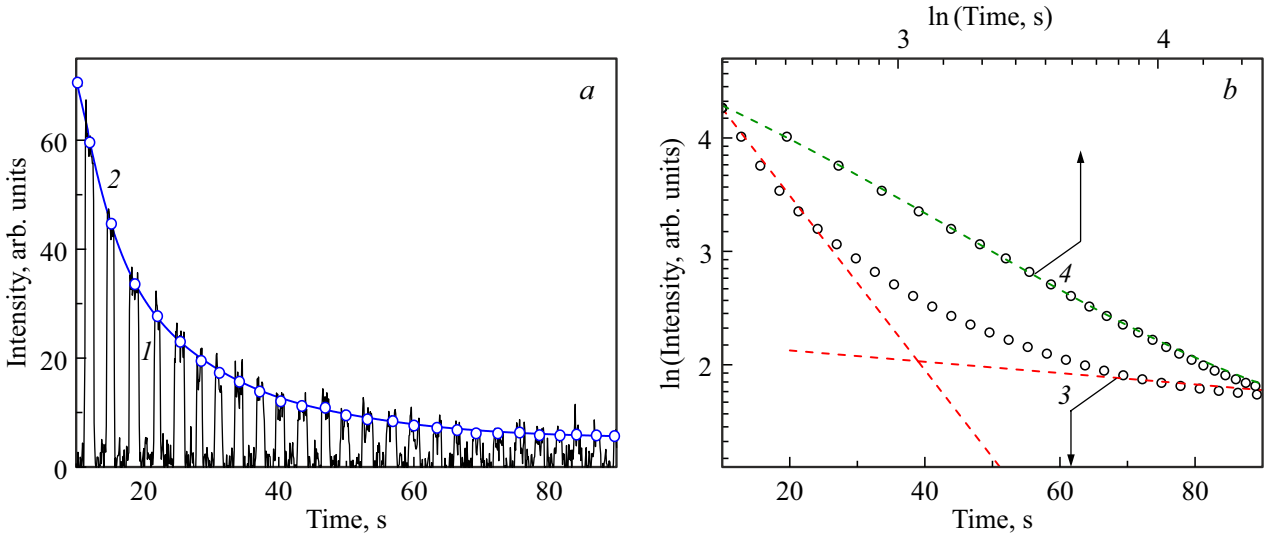

Рис. 4. Кинетика фосфоресценции образца керамики третьей группы после облучения электронами: *a*) сигнал с ФЭУ-62: кривая *1* — исходный модулированный сигнал фосфоресценции, *2* — огибающая по максимумам кривая; *b*) определение характерного времени затухания: *3* — кривая *2* в логарифмических координатах по оси интенсивности, красные пунктирные прямые — аппроксимация функцией (*1*), *4* — кривая *2* в логарифмических координатах по оси интенсивности и времени, пунктирная зеленая прямая — результат аппроксимации функцией (*2*).

Спектральное положение и кинетика широкой полосы поглощения при 487 nm хорошо соответствуют центру F-типа. В оксиде алюминия подобная полоса поглощения при 490 nm приписывается F_2^{2+}-центру [9]. Такие центры могут возникать и в кристаллической решетке Y_2O_3 кубической фазы, содержащей цирконий. В ней ионы Zr^{4+} замещают основные катионы Y^{3+}, которые располагаются в центре элементарного куба YO_6. Причем в 3/4 этих кубов естественные кислородные вакансии находятся на вершинах вдоль диагонали грани, а в 1/4 — вдоль пространственной диагонали [10]. При вхождении ионов циркония в четырехвалентном состоянии для компенсации их электрического заряда элементарные кубы могут достроиться до ZrO_8 за счет смещения ионов кислорода из соседних элементарных кубов. В результате часть этих соседних кубов превращается в искаженные полиэдры с кислородными вакансиями (V_O). Кроме того, в керамике из оксида иттрия присутствуют кислородные вакансии, образующиеся при высокотемпературном спекании керамики в вакууме за счет испарения кислорода. Последующий просветляющий отжиг на воздухе полностью не компенсирует дефицит кислорода. Таким образом, полосу поглощения при 487 nm, присутствующую в образцах керамики из оксида иттрия с добавлением оксида циркония в качестве спекающей добавки, следует связать с центром поглощения F-типа. Причем этот центр образуется во время действия электронного пучка при захвате кислородными вакансиями свободных электронов. Образующиеся при этом центры окраски F-типа являются относительно долгоживущими. В первые 478 h после облучения электронным пучком спад

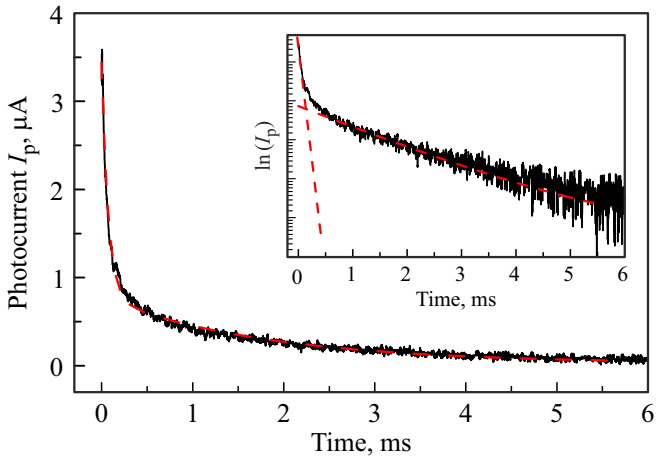

Рис. 5. Затухание фототока I_p от люминесценции на длине волны 1030 nm образца третьей группы. Пунктирная красная линия — результат аппроксимации функцией (1). На вставке приведена кривая затухания в логарифмическом масштабе по оси I_p.

оптической плотности на полосе поглощения протекает по экспоненциальному закону с характерным временем около 80 h.

Фосфоресценция в области 890–1200 nm наблюдается только в образцах керамики третьей группы после их облучения электронным пучком. Это позволяет предположить, что в формировании излучающих ее центров принимают участие ионы иттербия и циркония. Гиперболический характер затухания этой полосы фосфоресценции

позволяет предположить, что она является результатом излучательной рекомбинации электронного и дырочного центров. В качестве таковых могут выступать ионы Yb^{2+} и O^{1-}, образующиеся в результате переноса заряда во время действия электронного пучка в искаженных ионом Zr^{4+} полиэдрах. Ранее [4] при исследовании спектров комбинационного рассеяния лазерного излучения на длине волны 785 nm в образцах третьей группы была обнаружена широкая полоса фотолюминесценции 890–1050 nm. В [4] показано, что эта полоса имеет сложный состав. В нее входят ИК-полосы излучения иона Yb^{3+}. Фотовозбуждение на длине волны 785 nm указывает на то, что эти центры могут присутствовать и в предварительно необлученных электронным пучком образцах. В частности, они могут представлять собой ионы Yb^{2+}, расположенные в искаженных полиэдрах или стабилизированные радикалами органики, в небольших количествах присутствующих в образцах.

В настоящее время спектральное положение энергетических уровней иона Yb^{2+} в оксиде иттрия экспериментально однозначно не выявлено. Исходя из справочных данных для свободного иона Yb^{2+} и штарковского расщепления в кристаллическом поле кубической симметрии [11,12], уровни конфигурации $4f^{13}5d^1$ этого иона располагаются на $(30-55)\cdot 10^3\,\mathrm{cm}^{-1}$ выше основного состояния $4f^{14}(^1S_0)$. При ширине запрещенной зоны в оксиде иттрия около $40000\,\mathrm{cm}^{-1}$ (250 nm, граница фундаментального поглощения на рис. 2) верхняя энергетическая зона орбитального триплета $4f^{13}5d^1(^2F_{5/2}t_{2g})$ располагается в зоне проводимости, тогда как нижняя зона триплета $4f^{13}5d^1(^2F_{7/2}t_{2g})$ и две зоны орбитального дублета $4f^{13}5d^1(^2F_{7/2,5/2}e_g)$, так же, как в иттрий-алюминиевом гранате [11], могут располагаться в запрещенной зоне. Переходы из основного состояния иона Yb^{2+} на эти уровни должны проявляться в виде полос поглощения в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Однако в спектрах пропускания (рис. 2) керамики, содержащей иттербий, отсутствуют полосы поглощения, которые можно связать с этими переходами.

В то же время энергетическое положение уровней иона Yb^{2+} в искаженных ионом Zr^{4+} полиэдрах может быть существенно другим. А именно, уровни зон орбитального дублета $4f^{13}5d^1(^2F_{7/2,5/2}e_g)$ могут иметь более низкое положение, достаточное для их возбуждения излучением с длиной волны 785 nm [4]. Причем, при облучении образцов электронным пучком может осуществляться дополнительная генерация ионов Yb^{2+} путем захвата свободного электрона возбужденным ионом $Yb^{3+}(^2F_{5/2})$ с характерным временем $70\,\mu$s. Этот процесс отражается в кинетике затухания импульсной катодолюминесценции на полосе 1030 nm (рис. 5). В ней четко проявляются два экспоненциальных механизма спада интенсивности с характерными временами: $\tau_1 = 70.2 \pm 5.1\,\mu$s и $\tau_2 = 1.64 \pm 0.08$ ms, тогда как при фотовозбуждении лазерным диодом с длиной волны 976 nm тех же образцов керамики в кинетике этой полосы отсутствует быстрая составляющая τ_1. Поэтому следует считать, что характерное время $\tau_2 = 1.64 \pm 0.08$ ms есть время жизни уровня $^2F_{5/2}$ иона Yb^{3+}, а $\tau_1 \approx 70.2 \pm 5.1\,\mu$s отражает скорость девозбуждения излучательного уровня $^2F_{5/2}$ путем захвата электрона. Отсюда можно оценить вклад дополнительного механизма девозбуждения в интегральную интенсивность полосы при 1030 nm иона Yb^{3+} как

$$(A\cdot\tau_1)/(B\cdot\tau_2) \approx 0.15-0.28. \qquad (3)$$

Здесь A и B — коэффициенты аппроксимирующей формулы (1). В первом приближении выражение (3) дает оценку отношения содержаний двух- и трехвалентных ионов иттербия в образцах.

5. Заключение

В ходе проведенных исследований установлено, что в образцах керамики на основе оксида иттрия, содержащих оксид циркония ($Y_2O_3 + 5\,\mathrm{mol.\%}\,ZrO_2$ и $Yb:Y_2O_3 + 5\,\mathrm{mol.\%}\,ZrO_2$) после облучения наносекундными пучками электронов со средней энергией 170 keV и плотностью тока $130\,\mathrm{A/cm}^2$ возникают центры окраски F-типа. Их самопроизвольный распад при комнатной температуре осуществляется по экспоненциальному закону с характерным временем около 80 h.

В образцах керамики, содержащей цирконий и иттербий ($Yb:Y_2O_3 + 5\,\mathrm{mol.\%}\,ZrO_2$), после облучения электронным пучком наблюдается фосфоресценция с гиперболическим законом спада интенсивности. Центр фосфоресценции представляет собой нестабильную электронно-дырочную пару с основой $Yb^{2+}-O^{1-}$.

Предполагается, что эти наблюдаемые эффекты обусловлены искажением кристаллических полиэдров в окрестностях примесных ионов циркония.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20074, https://rscf.ru/project/24-19-20074/, при финансовой поддержке со стороны Правительства Свердловской области.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S.N. Bagayev, V.V. Osipov, V.A. Shitov, E.V. Pestryakov, V.S. Kijko, R.N. Maksimov, K.E. Lukyashin, A.N. Orlov, K.V. Polyakov, V.V. Petrov. J. Eur. Ceram. Soc. **32**, *16*, 4257 (2012).

[2] J. Lu, K. Takaichi, T. Uematsu, A. Shirakawa, M. Musha, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, A.A. Kaminskii. Jpn. J. Appl. Phys. **41**, *12A,* L1373 (2002).

[3] K. Takaichi, H. Yagi, J. Lu, J.-F. Bisson, A. Shirakawa, K. Ueda, T. Yanagitani, A.A. Kaminskii. Appl. Phys. Lett. **84**, *3*, 317 (2004).
[4] В.И. Соломонов, В.В. Осипов, В.А. Шитов, Р.Н. Максимов, А.В. Спирина, А.С. Макарова, А.Н. Орлов, О.Н. Чайковская, А.А. Щукина, М.С. Снегерев, Ю.В. Кистенев. ЖПС **92**, *3*, 326 (2025).
[5] К.К. Бобков, А.А. Рыбалтовский, В.В. Вельмискин, М.Е. Лихачев, М.М. Бубнов, Е.М. Дианов, А.А. Умников, А.Н. Гурьянов, Н.Н. Вечканов, И.А. Шестакова. Квантовая электроника **44**, *12*, 1129 (2014). [K.K. Bobkov, A.A. Rybaltovsky, V.V. Vel'miskin, M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, E.M. Dianov, A.A. Umnikov, A.N. Gur'yanov, N.N. Vechkanov, I.A. Shestakova. Quantum Electron. **44**, *12*, 1129 (2014).]
[6] V.V. Osipov, V.V. Platonov, V.V. Lisenkov, E.V. Tikhonov, A.V. Podkin. Appl. Phys. A **124**, *1*, 3 (2018).
[7] V.I. Solomonov, S.G. Michailov, A.I. Lipchak, V.V. Osipov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, M.R. Ulmaskulov. Laser Phys. **16**, *1*, 126 (2006).
[8] В.И. Соломонов, А.В. Спирина, С.Ф. Конев, С.О. Чолах. Опт. и спектр. **116**, *5*, 862 (2014). [V.I. Solomonov, A.V. Spirina, S.F. Konev, S.O. Cholakh. Opt. Spectrosc. **116**, *5*, 793 (2014).]
[9] Д.В. Ананченко, С.В. Никифоров, Г.Р. Рамазанова, Р.И. Баталов, Р.М. Баязитов, Г.А. Новиков. Опт. и спектр. **128**, *2*, 211 (2020). [D.V. Ananchenko, S.V. Nikiforov, G.R. Ramazanova, R.I. Batalov, R.M. Bayazitov, H.A. Novikov. Opt. Spectrosc. **128**, *2*, 207 (2020).]
[10] G. Schaack, J.A. Koningstein. J. Opt. Soc. Am. **60**, *8*, 1110 (1970).
[11] М.В. Еремин. Опт. и спектр. **29**, *1*, 100 (1970).
[12] T.S. Piper, J.P. Brown, D.S. McClure. J. Chem. Phys. **46**, *4*, 1353 (1967).

Редактор Е.В. Толстякова