

МРНТИ 29.31.23
Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2026-156-3-258-272>

Примесная люминесценция и селективное вакуумно-ультрафиолетовое возбуждение номинально нелегированного кристалла $YAlO_3$

М. Токашева , А. Бақытқызы , Ж. Карипбаев* ,
Г. Баубекова , А.Жунусбеков , А. Какимов 

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

*tokasevami@gmail.com; aizat.bakytqyzy.1@gmail.com; karipbayev_zht_1@enu.kz;
baubekova_gm@enu.kz; zhunusbekov_am@enu.kz; kakimov_ab_3@enu.kz

Аннотация. Исследованы спектр излучения номинально нелегированного монокристалла алюмината иттрия $YAlO_3$ при энергии возбуждения 7,75 эВ и спектры возбуждения девяти эмиссионных каналов при 300 К. Основные измерения выполнены на канале Р66 источника синхротронного излучения PETRA III (DESY). Совместный анализ исходных сигналов, нормированных зависимостей и межканальных отношений выявил две группы возбуждения. Для каналов 352,6, 465, 523,6 и 794,6 нм характерен общий максимум около 7,85 эВ, который интерпретируется как область эффективного межзонного возбуждения матрицы $YAlO_3$ с последующей передачей энергии на следовые примесные центры. Такая интерпретация согласуется с опубликованным для YAP при комнатной температуре значением прямой запрещенной зоны около 7,63 эВ, однако положение и амплитуда максимума не используются для количественного определения ширины запрещенной зоны или эффективности переноса энергии без независимой проверки коррекции на спектральный поток. Каналы 724,4 и 749,4 нм преимущественно возбуждаются в области 6,8-6,9 эВ и имеют коэффициент корреляции 0,982. Дублет 722,7/725,0 нм отнесен к Cr^{3+} , а последовательность линий 875,5, 884,4 и 891,9 нм и слабая группа 915-916 нм согласуются со штарковской структурой Nd^{3+} . Полученные результаты показывают эффективность ВУФ-синхротронной спектроскопии для выявления следовых непреднамеренных примесей.

Ключевые слова: $YAlO_3$; примесная люминесценция; вакуумный ультрафиолет; синхротронное излучение; спектры возбуждения; Cr^{3+} ; Nd^{3+} .

Поступила 8.09.2026. После доработки 14.09.2026. Принята к печати 14.09.2026. Доступно онлайн 30.09.2026.

*автор для корреспонденции

Введение

Алюминат иттрия YAlO_3 (YAP) представляет интерес как широкозонная оптическая матрица, в которой одновременно проявляются собственные дефекты и примесные центры. В ортогональной перовскитной структуре редкоземельные ионы могут замещать Y^{3+} , тогда как переходные металлы способны формировать центры в катионной подрешётке и в комплексах с дефектами. Вакуумно-ультрафиолетовое (ВУФ) возбуждение позволяет заселять высоколежащие состояния, практически недоступные при обычном видимом или ближнем УФ-возбуждении, и тем самым исследовать не только внутрицентровые переходы, но и процессы зарядового переноса, фотоионизации и передачи энергии от матрицы к примесным ионам [1].

Для оптически активных примесей люминесцентная спектроскопия относится к наиболее чувствительным методам диагностики твёрдых тел. Для кристаллических дефектов и примесей предел обнаружения по характерному свечению часто находится ниже 1 ppm, а в специализированных оптических экспериментах возможна регистрация значительно меньших концентраций [2, 3]. Это принципиально отличает люминесцентную диагностику от методов, ориентированных на основной химический или фазовый состав. Так, для SEM-EDS практический предел обнаружения многих элементов обычно имеет порядок 0,1 мас. % (около 10^3 ppm) [4], тогда как XRD прежде всего характеризует кристаллические фазы и структуру, а не следовое содержание отдельных оптически активных ионов. Поэтому отсутствие примеси в EDS или отсутствие отдельной фазы на дифрактограмме не исключает её спектроскопического проявления.

Термин «номинально нелегированный» означает лишь отсутствие преднамеренного введения активатора и не эквивалентен химической чистоте на ppm-уровне. Особенно важны редкоземельные примеси, которые могут сопровождать исходные соединения иттрия вследствие близости химических свойств элементов редкоземельного ряда; определение следовых RE-примесей в высокочистом Y_2O_3 само по себе является отдельной аналитической задачей [5]. Для материалов на основе иттрия показано, что даже коммерчески высокочистые образцы могут содержать оптически регистрируемые следовые RE-ионы [3]. Аналогично, примеси переходных металлов, поступающие с исходными компонентами и технологической оснасткой, могут образовывать оптически активные центры. В YAP экспериментально изучены Mn-содержащие центры и их дозиметрическая люминесценция [6-8], а расчёты для $\text{Ti}^{3+}/\text{Ti}^{2+}$ показывают возможность формирования локализованных примесных уровней в запрещённой зоне при замещении Al^{3+} [9].

Непреднамеренные примеси уже наблюдались непосредственно в номинально нелегированном YAP: в литературе описаны линии Cr^{3+} и Sm^{3+} , а также широкие компоненты, связанные с дефектами решётки [10]; для YAP установлены полосы F^+ и F -центров [11]. Следовательно, отнесение спектра к одному «собственному» механизму только на основании паспортного состава недостаточно. Идентификация должна опираться на совокупность признаков: мультиплетную или штарковскую структуру, характерный дублет, спектр возбуждения выбранной линии и согласованность с энергетической схемой.

Для оксидных материалов особенно информативны высокоэнергетические спектры возбуждения. Прямые внутрицентровые 4f-4f или d-d переходы могут иметь сравнительно малую силу осциллятора, тогда как полосы переноса заряда от лиганда к металлу, переходы примесь-зона и межзонное возбуждение матрицы способны формировать значительно более эффективные каналы с последующей локализацией носителей или передачей энергии на примесный центр [12]. Для YAlO_3 опубликованные ВУФ-данные при комнатной температуре дают прямую ширину запрещённой зоны около 7,63 эВ [13]. Поэтому следовые примеси могут наиболее контрастно проявляться при возбуждении в области фундаментального поглощения матрицы, где образованные электронно-дырочные возбуждения и носители энергии эффективно передаются на локальные примесные центры.

Такой подход подтверждается нашими предыдущими синхротронными исследованиями широкозонных диэлектриков. Для YAG:Eu и YAG:Cr были выявлены существенно различающиеся ВУФ-каналы, включающие примесные состояния, Eu-О зарядовый перенос и межзонные процессы матрицы [14]. В BaMgF_4 синхротронное возбуждение разделило краевые межзонные/экситонные и дефектные каналы [15]. В YAG:Nd ВУФ-спектры позволили сопоставить возбуждение Nd^{3+} -излучения и дефектных полос [16], а для $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ переход от краевого возбуждения к возбуждению через дефектный хвост был показан при накоплении радиационных дефектов [17]. Эти результаты формируют непосредственную методическую

основу настоящей работы: спектр излучения номинально чистого YAP рассматривается совместно со спектрами возбуждения отдельных эмиссионных каналов, а не как набор изолированных максимумов.

Цель настоящего исследования состоит в спектроскопической идентификации оптически активных непреднамеренных примесей в номинально нелегированном монокристалле YAlO_3 и установлении различий между каналами их возбуждения. Особое внимание уделено проверке гипотезы об эффективном возбуждении части примесных центров через межзонное возбуждение матрицы в области около 7,85 эВ, анализу селективного возбуждения Cr^{3+} -связанных красных каналов около 6,8-6,9 эВ и сопоставлению возможностей лабораторного спектрофлуориметра CM 2203 с ВУФ-синхротронной станцией P66 PETRA III.

Материалы и методы

Исследован номинально нелегированный монокристаллический образец YAlO_3 (YAP), полученный от Kinheng International Holding Co., Ltd. (Шанхай, Китай), с ориентацией (100) и размерами $10 \times 5 \times 0,5$ мм.

Основные спектры люминесценции и возбуждения измерены при 300 К на канале P66 синхротронного источника PETRA III в DESY (Гамбург, Германия). P66 обеспечивает перестраиваемое возбуждение в диапазоне 3,7-40 эВ; опубликованный поток на образце достигает 4×10^{12} фотон/с при 7,75 эВ (160 нм) [18]. Для лабораторного сопоставления тот же образец исследовали на спектрофлуориметре SOLAR CM 2203 с ксеноновым источником. Спектральный диапазон прибора в режиме спектрофлуориметра начинается примерно с 220 нм [19], что соответствует максимальной энергии возбуждающих фотонов около 5,64 эВ и принципиально не позволяет непосредственно возбуждать фундаментальную область YAlO_3 около 7,6-7,9 эВ. В доступном диапазоне и при использованной геометрии измерений люминесценция данного номинально нелегированного образца не была надёжно зарегистрирована выше уровня шума; совокупной спектральной яркости ксенонового источника после монохроматора и чувствительности лабораторного канала регистрации оказалось недостаточно для уверенного наблюдения слабых следовых центров. В CM 2203 регистрация в режиме спектрофлуориметра выполняется ФЭУ Hamamatsu R928 [19], тогда как на P66 доступны CCD Newton 920 и специализированные ФЭУ Hamamatsu R6358/R3809U-50 [18]. Поскольку для конкретной конфигурации CM 2203 не приведён калиброванный поток фотонов непосредственно на образце, количественное отношение потоков CM 2203/P66 не рассчитывалось.

Спектр люминесценции анализировался без сглаживания, гауссова разложения и дополнительно вычитания фона. Положения выраженных максимумов определялись по исходным отсчётам; слабые особенности не объявлялись самостоятельными линиями только по наличию локального максимума. Для сравнения форм каждый спектр на общей сетке делился на собственный максимум:

$$P_j(E) = \frac{S_j(E)}{\max S_j(E)} \quad (1)$$

Нормировка (1) изменяет только масштаб ординаты. Она не устраняет спектральную зависимость падающего потока и не переводит исходные значения в абсолютный квантовый выход. На P66 для коррекции спектров возбуждения используется эталонный спектр салицилата натрия [18]. В настоящей работе анализ выполнен по экспортированным относительным сигналам; независимая радиометрическая проверка применённой при экспорте коррекции на поток не проводилась. Поэтому положения общих максимумов обсуждаются совместно с независимыми литературными данными о фундаментальном поглощении YAlO_3 , а не используются как самостоятельное измерение ширины запрещённой зоны.

Для явного разделения измеряемого сигнала и отклика образца использована модель

$$S_j(E) = G_j \Phi(E) L_j(E) + B_j(E) \quad (2)$$

где G_j объединяет постоянные для данного канала множители регистрации, $\Phi(E)$ – общий спектральный профиль падающего потока, $L_j(E)$ – эффективный люминесцентный отклик, $B_j(E)$ – аддитивный фон. Дополнительная метрика – двойное межканальное отношение относительно канала 465 нм:

$$D_{j/465}(E) = \frac{\frac{S_j(E)}{S_{465}(E)}}{\frac{S_j(E_0)}{S_{465}(E_0)}}, \quad E_0 = 7.8 \quad (3)$$

При пренебрежимо малом или корректно вычтенном фоне, стабильных настройках и одинаковом профиле потока в последовательных сканах выражение (3) сокращает общий множитель $\Phi(E)$ и постоянные масштабы каналов. Это условный способ сравнения спектральной селективности, а не замена радиометрической калибровки. Вычислены также коэффициенты корреляции Пирсона на участке 6-12,4 эВ и отношение максимумов $R_{a\beta}$ в окнах А = 6,4-7,45 эВ и В = 7,5-8,6 эВ. Корреляции являются описательными: независимые повторы и оценки воспроизводимости отсутствуют.

Результаты и обсуждение

1. Спектр люминесценции и примесные центры

1.1. Общая структура спектра

В спектре (рисунок 1) выделяются интенсивная ультрафиолетовая группа 351,6/354,4 нм, сложная синяя область 455-476 нм с максимумом 465,1 нм, зелёные компоненты 522,5/526,6 нм и более слабая красная структура. Ближняя инфракрасная область содержит широкую структурированную составляющую 730-825 нм и узкие линии после 865 нм. Такое сочетание не описывается одной широкой дефектной полосой. Вместе с тем распределение высот максимумов на рисунке не является распределением концентраций центров: отсутствуют необходимые коэффициенты спектральной чувствительности и эффективности возбуждения.

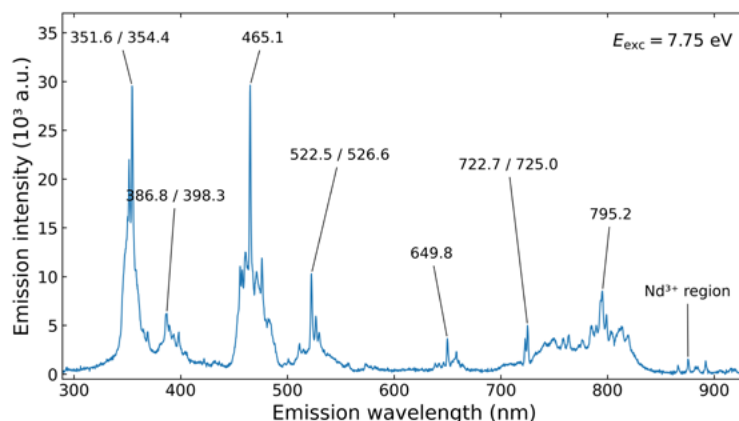


Рисунок 1. Спектр люминесценции номинально нелегированного YAP при энергии возбуждения 7.75 эВ при 300 К

Рабочие спектроскопические отнесения сведены в таблицу 1. «Высокая» уверенность означает согласованность характерной структуры с известной спектроскопией YAP, но не подменяет независимое химическое определение примеси. Для перекрывающихся областей перечислены альтернативы. Особенно важно учитывать, что ВУФ-возбуждение может менять набор населённых верхних уровней по сравнению с обычным УФ-возбуждением [1, 20, 21].

Таблица 1. Рабочая идентификация основных эмиссионных групп и степень обоснованности отнесений

λ, нм	Ион/центр	Переход или физическая интерпретация	Статус и источники
351,6; 354,4	Tm ³⁺	Кандидаты Tm ³⁺ : $^1D_2 \rightarrow ^3H_6$; в литературе также $^1I_6 \rightarrow ^3F_4$	[11, 20, 21]
386,8	Nd ³⁺	Кандидат: $^2G(2)_{9/2} \rightarrow$ смешанные $^2G(1)_{9/2} + ^2D_{3/2}$; расчётное совпадение 386,80 нм	Вероятно; одна линия не исключает иных RE ³⁺ ; [1]
398,3	RE ³⁺	Область перекрывающихся высоколежащих 4f–4f переходов; точный ион и пара уровней не установлены	Не идентифицировано; [1, 21]
455-465; 465,1	Tm ³⁺	Основной кандидат: $^1D_2 \rightarrow ^3F_4$; сложная штарковская/перекрывающаяся структура	Предварительно; [20, 21]
471-476	Tm ³⁺ / Er ³⁺	Tm ³⁺ : $^1G_4 \rightarrow ^3H_6$; Er ³⁺ при ВУФ: $^2P_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	Перекрытие; [1, 20, 21]
522,5; 526,6	Er ³⁺	$^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ либо ВУФ-ветвь $^2P_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	Вероятный кандидат, верхний уровень не установлен; [1]
573-578	Sm ³⁺ / Dy ³⁺	Sm ³⁺ : $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{5/2}$; Dy ³⁺ : $^4F_{9/2} \rightarrow ^6H_{13/2}$	Слабый сигнал; [10, 22]
638-665; 649,8; 658,2	Tm ³⁺ / Er ³⁺ / Sm ³⁺	Tm ³⁺ : $^1G_4 \rightarrow ^3F_4$; Er ³⁺ : $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$; Sm ³⁺ : $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{9/2}$	Разделение вкладов не выполнено; [1, 10, 20, 21]
722,7; 725,0	Cr ³⁺	$^2E \rightarrow ^4A_2$: R ₂ /R ₁ -дублет иона Cr ³⁺ в позиции Al ³⁺	Высокая уверенность; [10]
около 750	Cr ³⁺	Возможный фононный спутник R-излучения; сдвиг около 462 см ⁻¹	Поддержано совместным PL/PLE-анализом; дефектный вклад не исключён; [10, 223]
785-820; 795,2	Tm ³⁺ ; другие	Tm ³⁺ : $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$ — кандидат; возможны другие RE-переходы и вклад дифракционных порядков	Предварительно; [1, 21, 18]
875,5; 884,4; 891,9; 915-916	Nd ³⁺	$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$: штарковская последовательность; около 866 нм возможна ветвь верхнего подуровня.	Высокая уверенность по группе; [1]

1.2. Красный дублет Cr³⁺ и его связь с полосой около 750 нм

На рисунке 2 показана красная и ближняя инфракрасная часть спектра. Максимумы 722,7202 и 724,9814 нм образуют характерный для Cr³⁺ в YAP дублет, наблюдавшийся также в номинально нелегированных образцах [10]. Его отнесение к переходу $^2E \rightarrow ^4A_2$ значительно надёжнее идентификации одиночной широкой полосы. Разность волновых чисел максимумов составляет 43,2 см⁻¹. Значения относятся к максимумам зарегистрированной структуры и не являются результатом подгонки аппаратно-разрешённых бесфононных линий.

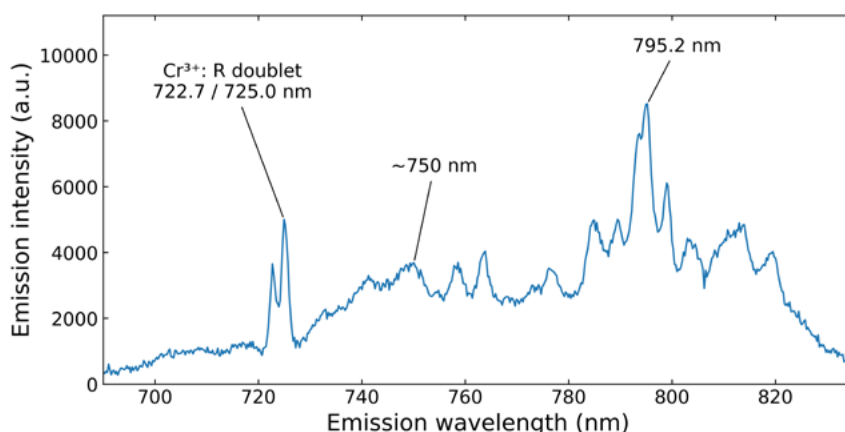


Рисунок 2. Красная и ближняя инфракрасная области спектра

Связь полосы около 750 нм с Cr^{3+} проверяется далее по возбуждению. Дополнительный аргумент даёт её энергетическое расстояние от R_1 -линии:

$$\Delta\tilde{\nu} = 10^7 \left(\frac{1}{\lambda_{R1}} - \frac{1}{\lambda_s} \right) \approx 461.8 \text{ см}^{-1} \quad (4)$$

Здесь $\lambda_{R1} = 724,9814$ нм, $\lambda_s = 750,0957$ нм; для самих каналов регистрации 724,4 и 749,4 нм разность равна $460,5 \text{ см}^{-1}$. Для YAlO_3 известны колебательные моды в этой области, а современное исследование вибрационной спектроскопии подтверждает наличие моды порядка 460 см^{-1} [23]. Такое энергетическое согласование делает вибронную интерпретацию правдоподобной, но не доказывает участие единственной фононной моды и не исключает перекрывающегося дефектного излучения.

1.3. Штарковская последовательность Nd^{3+}

Независимое свидетельство примесной люминесценции даёт группа после 865 нм. Для нижнего штарковского подуровня $^4F_{3/2}$ с энергией около 11425 см^{-1} и подуровней $^4I_{9/2}$, расположенных при 0, 117, 215, 501 и 673 см^{-1} , литературные данные YAP:Nd^{3+} [1] дают расчётные длины волн по выражению

$$\lambda_{if} = \frac{10^7}{\tilde{\nu}_i - \tilde{\nu}_f}, \quad (5)$$

где уровни заданы в см^{-1} , а результат – в нм. Сопоставление не содержит свободных параметров подгонки (таблица 2, рисунок 3). Совпадение первых трёх линий и наличие слабой группы в ожидаемой области 915-916 нм поддерживают отнесение к Nd^{3+} . Отсутствие в массиве ожидаемой линии около 930 нм не противоречит этому: измерение заканчивается на 927,71 нм.

Таблица 2. Проверка отнесения к Nd^{3+} : переходы с уровня 11425 см^{-1} на подуровни $^4I_{9/2}$ [1]

Нижний уровень, см^{-1}	$\lambda_{\text{расч}}$, нм	$\lambda_{\text{эсп}}$, нм	$\lambda_{\text{эсп}} - \lambda_{\text{расч}}$, нм
0	875,27	875,47	+0,20
117	884,33	884,44	+0,11
215	892,06	891,92	-0,14
501	915,2	слабая группа 915-916	не определено
673	930,06	вне диапазона	–

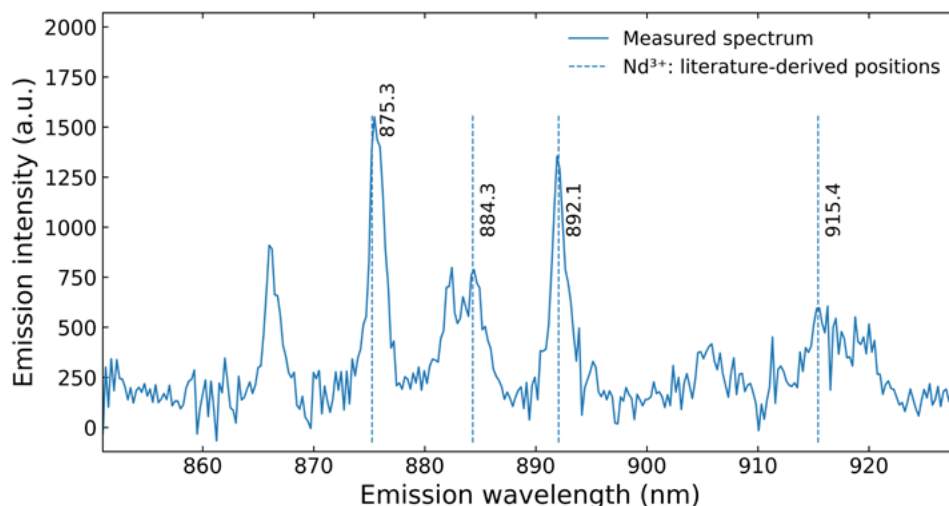


Рисунок 3. Ближняя ИК-область спектра YAP и расчётные положения линий Nd^{3+} [1]

Расхождения порядка 0,1-0,2 нм сопоставимы с шагом цифровой регистрации; точное их обсуждение требует сведений о калибровке и принятой шкале длин волн. Линия около 866,0 нм согласуется с переходом с верхнего подуровня $^4\text{F}_{3/2}$ около 11552 см^{-1} , но не используется как термометрический показатель. Кроме того, уровень $^2\text{G}(2)_{9/2}$ при 46718 см^{-1} и смешанный нижний уровень около 20865 см^{-1} [1] дают 386,80 нм, практически совпадая с максимумом 386,84 нм. Поэтому именно эту УФ-линию нельзя считать однозначным доказательством Tb^{3+} : высоколежащий переход уже обнаруженного Nd^{3+} представляет содержательную альтернативу.

1.4. Неоднозначные редкоземельные и дефектные составляющие

Совместное присутствие групп около 350, 460 и 795 нм совместимо с вкладом Tm^{3+} [20, 21], однако такая комбинация не заменяет селективной спектроскопии. В частности, для УФ-полос Tm^{3+} в литературе обсуждаются разные верхние состояния, а широкая подложка около 355 нм может перекрываться с F^+ -излучением [11, 20, 21]. По одному спектру здесь невозможно надёжно разделить электронные переходы и дефектный континуум.

Для зелёных линий Er^{3+} является обоснованным кандидатом, но обычное отнесение всей группы к $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ не единственно. В ВУФ-условиях необходимо проверить ветвь $^2\text{P}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$. Из опубликованных уровней 31585, 31449 и 12446 см^{-1} [1] следуют 522,49 и 526,23 нм; они близки наблюдаемым 522,54 и 526,60 нм. Это расчётная проверка альтернативы, а не доказательство выбранного верхнего состояния. Отсюда также следует, что отношение двух зелёных линий нельзя автоматически использовать для болцмановской термометрии до установления их происхождения.

Наличие слабой группы 573-578 нм допускает Sm^{3+} или Dy^{3+} [10, 22]. Однако ожидаемая для Sm^{3+} согласованная серия около 600-618 нм в настоящем массиве не выделяется убедительно над фоном. Поэтому Sm^{3+} , равно как Dy^{3+} и Tb^{3+} , не включается в перечень уверенно идентифицированных примесей. Узкая структура около 523 нм сама по себе не является характерным доказательством широкой Mn^{2+} -полосы.

2. Спектры возбуждения: общие и селективные каналы

2.1. Сравнение исходных и нормированных зависимостей

На рисунке 4 сохранена исходная относительная шкала сигналов. Наибольшие значения имеют каналы 352,6 и 465 нм, однако без единой калибровки чувствительности и условий накопления их высоты нельзя непосредственно сопоставлять как эффективности разных центров. Нормировка на максимум (рисунок 5) выявляет различие форм, которое практически скрыто при совместном отображении слабых и сильных кривых. Поэтому обе формы представления дополняют, а не заменяют друг друга.

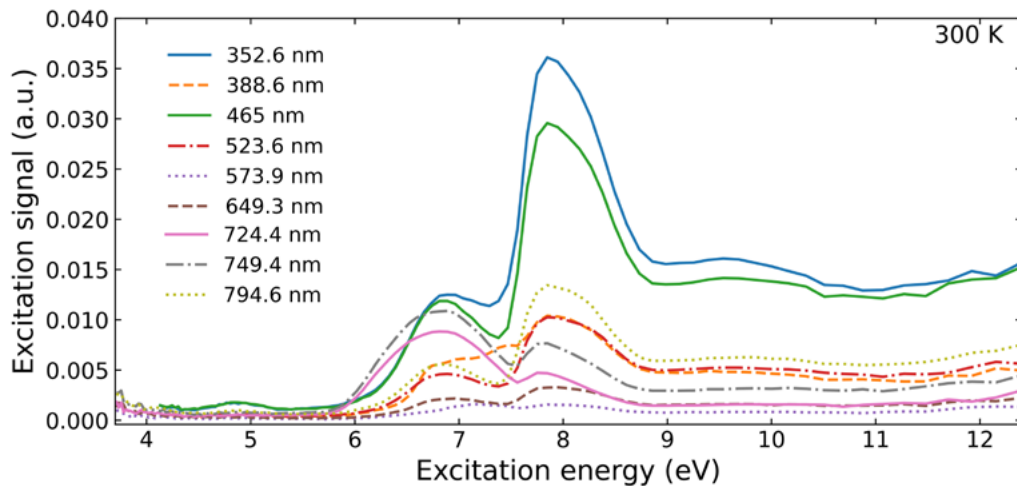


Рисунок 4. Спектры возбуждения на разных полосах люминесценции при 300 К в исходной относительной шкале

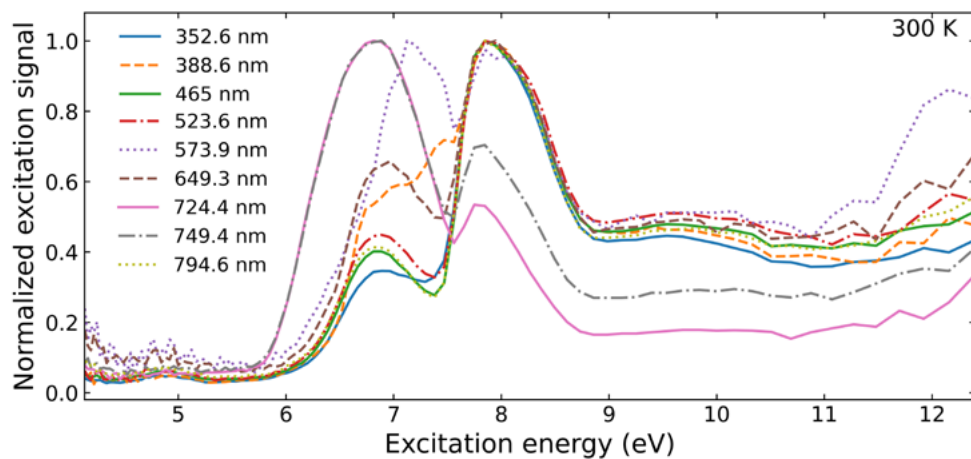


Рисунок 5. Спектры возбуждения, нормированные на индивидуальный максимум на общей сетке 4,13-12,4 эВ

Для каналов 352,6, 465, 523,6 и 794,6 нм доминирует общий максимум около 7,85 эВ. Их корреляции с каналом 465 нм составляют соответственно 0,992, 1,000, 0,997 и 0,998, а отношение максимумов $R_{a\beta}$ лежит в узком интервале 0,346-0,448. Положение общего максимума попадает в область фундаментального поглощения YAlO_3 : по независимым ВУФ-измерениям при комнатной температуре для YAP получен прямой $E_g \approx 7,63$ эВ [13]. Поэтому для этой группы наиболее физически последовательной является интерпретация через возбуждение электронов из валентной зоны в зону проводимости с последующей релаксацией и передачей энергии на непреднамеренные примесные центры. При этом совпадение форм не устанавливает химически тождественный центр, а амплитуда и точное положение максимума не рассматриваются как количественная мера эффективности переноса энергии без независимой радиометрической калибровки.

Каналы 724,4 и 749,4 нм ведут себя иначе: их главные максимумы находятся около 6,81 и 6,89 эВ, а $R_{a\beta}$ равны 1,873 и 1,421. В диапазоне 6-12,4 эВ коэффициент корреляции этих двух кривых равен 0,982, тогда как с каналом 465 нм получаются -0,224 и -0,043. Последние значения описывают различие форм на выбранном интервале и не означают отрицательной вероятности переноса энергии. Такое разделение красной и УФ-видимой групп представляет более существенный результат, чем визуальная общность высокоэнергетического фона.

Таблица 3. Численные характеристики девяти спектров возбуждения на общей сетке

$\lambda_{\text{рег}}$, нм	ЕА, эВ	ЕВ, эВ	$R_{\text{аб}}$	r с 465 нм	$D_{\text{ij}}/_{465}(6.889 \text{ эВ})$
352,6	6,89	7,85	0,346	0,992	0,862
388,6	7,38	7,85	0,694	0,876	1,385
465	6,81	7,85	0,401	1,000	1,000
523,6	6,89	7,85	0,448	0,997	1,118
573,9	7,13	7,85	1,026	0,648	1,930
649,3	6,97	7,95	0,657	0,922	1,624
724,4	6,81	7,75	1,873	-0,224	4,683
749,4	6,89	7,85	1,421	-0,043	3,543
794,6	6,81	7,85	0,413	0,998	1,027

Примечание к таблице 3. ЕА и ЕВ – положения наибольшего отсчёта внутри окон $A = 6,4\text{--}7,45$ эВ и $B = 7,5\text{--}8,6$ эВ; $R_{\text{аб}} = \max(A)/\max(B)$. Значение $E_A = 7,38$ эВ для 388,6 нм соответствует росту к следующей области и не объявляется самостоятельной разрешённой полосой. Корреляции вычислены на участке 6–12,4 эВ. Последний столбец рассчитан по выражению (3) при фиксированных энергиях 6,889 и 7,848 эВ и не тождествен отношению максимумов $R_{\text{аб}}$.

Каналы 388,6, 573,9 и 649,3 нм занимают промежуточное положение. Для 573,9 нм значения в окнах А и В близки, $R_{\text{аб}} = 1,026$, а корреляция с 465 нм ниже, $r = 0,648$. Для 649,3 нм получены $R_{\text{аб}} = 0,657$ и $r = 0,922$. Это совместимо с перекрытием нескольких вкладов либо с иной относительной эффективностью путей возбуждения, но не позволяет выбрать один из этих механизмов. В отсутствие кинетики и селективных спектров разложение каждой кривой на набор «ионных гауссиан» было бы недостаточно обоснованным.

2.2. Межканальные отношения и физическая интерпретация

Двойные отношения (рисунок 6) усиливают различие низкоэнергетического отклика. При 6,889 эВ $D_{724.4/465} = 4,683$ и $D_{749.4/465} = 3,543$. Для близкой к синей группе полосы 794,6 нм соответствующая величина равна 1,027. Иными словами, при переходе от 7,848 к 6,889 эВ красные каналы усиливаются относительно 465 нм в несколько раз, тогда как относительный отклик 794,6 нм почти не изменяется. Это не рост абсолютного квантового выхода в 4,7 раза, а изменение отношения зарегистрированных каналов при указанных предположениях модели (3).

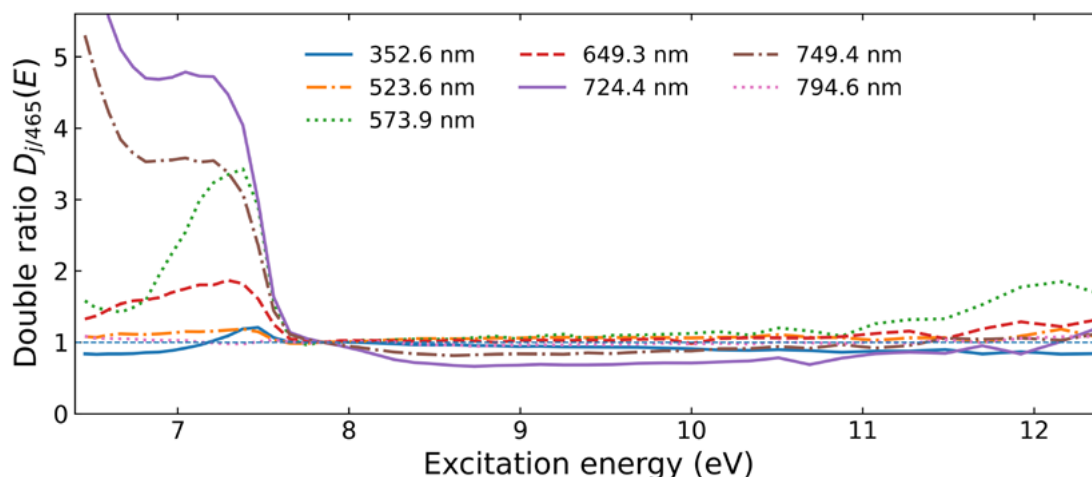


Рисунок 6. Двойные отношения выбранных спектров относительно канала 465 нм, приведённые к единице при $E_0 = 7,84$ эВ

Связь каналов 724,4 и 749,4 нм по форме возбуждения вместе с характерным R-дублетом и сдвигом около 462 см^{-1} поддерживает гипотезу о вкладе вибронного излучения Cr^{3+} в область 750 нм. Более слабое сходство канала 794,6 нм с красной парой, напротив, не поддерживает отнесение всего диапазона 730-825 нм к одной неизменной Cr^{3+} -компоненте. Здесь возможны перекрытия, и для проверки необходимы сравнение времён затухания R-линий и полосы 750 нм, а также спектры излучения при селективном возбуждении около 6,9 и 7,85 эВ.

Физическая интерпретация высокоэнергетической группы требует разделения двух вопросов: происхождения возбуждения и формы зарегистрированного спектра. Независимые ВУФ-измерения при комнатной температуре дают для YAP прямую ширину запрещённой зоны около 7,63 эВ [13], поэтому общий отклик каналов 352,6, 465, 523,6 и 794,6 нм около 7,85 эВ мы связываем с межзонным возбуждением матрицы и последующей передачей энергии на локальные примесные центры. Одновременно характеристика Р66 показывает максимум потока порядка 4×10^{12} фотон/с вблизи 7,75 эВ [18]. Таким образом, межзональная интерпретация основана на согласовании с независимыми данными о фундаментальном поглощении YAlO_3 , тогда как количественная форма PLE сохраняется в относительных единицах.

3. Сопоставление с лабораторной ксеноновой спектроскопией

Сопоставление измерительных возможностей показывает, почему слабая примесная люминесценция была обнаружена на Р66, но не зарегистрирована на СМ 2203. Лабораторный спектрофлуориметр работает в УФ-видимом диапазоне, начиная примерно с 220 нм ($\approx 5,64$ эВ), и поэтому не достигает области межзонного возбуждения YAlO_3 около 7,6-7,9 эВ [19, 13]. Р66 охватывает 3,7-40 эВ и при 7,75 эВ обеспечивает поток около 4×10^{12} фотон/с непосредственно на образце [18]. В нашем опыте возбуждение YAP на СМ 2203 в доступном диапазоне не дало надёжно регистрируемого сигнала от следовых примесей: после прохождения излучения ксеноновой лампы через монохроматор спектральная плотность возбуждения и чувствительность лабораторного канала регистрации оказались недостаточны для данного слабого сигнала. Поэтому преимущество Р66 определяется не просто большей «мощностью источника», а сочетанием доступа к ВУФ-области, высокой спектральной плотности фотонов на образце и специализированной высокочувствительной системой регистрации. Абсолютное численное отношение потоков двух установок не приводится, поскольку для использованной конфигурации СМ 2203 отсутствует калиброванное значение потока на образце.

Таблица 4. Сравнение возможностей СМ 2203 и Р66 для исследования номинально нелегированного YAP

Параметр	СМ 2203	Р66 PETRA III
Диапазон возбуждения	$\approx 220\text{--}820$ нм; $E \leq 5,64$ эВ	3,7–40 эВ
Источник	Импульсная ксеноновая лампа FX-4401	Синхротронное излучение от bending magnet
Регистрация	ФЭУ Hamamatsu R928	CCD Newton 920; ФЭУ Hamamatsu R6358/R3809U-50
Поток при 7,75 эВ	Область недоступна; поток на образце не определён	$\approx 4 \times 10^{12}$ фотон/с на образце
Результат для данного YAP	Надёжная люминесценция не зарегистрирована	Примесные PL/PLE-сигналы зарегистрированы
Ключевое преимущество	УФ-видимая лабораторная спектроскопия	Доступ к межзональному ВУФ-возбуждению + высокий поток + специализированная регистрация

4. Люминесцентная диагностика следовых примесей в номинально чистом YAP

Полученный результат имеет более общий аналитический смысл. Люминесцентный спектр в данном случае выступает как высокочувствительный «отпечаток» оптически активных примесей: характерные линии могут наблюдаться при концентрациях, лежащих ниже возможностей обычного SEM-EDS и не приводящих к появлению отдельной фазы в XRD [2, 4]. При этом люминесценция не является прямым количественным аналогом масс-спектрометрии: интенсивность определяется не только концентрацией, но и сечением возбуждения, вероятностью переноса энергии, тушением, оптической геометрией и спектральной чувствительностью регистрации. Поэтому по настоящим данным корректно устанавливать присутствие и механизм возбуждения центра, но не абсолютную концентрацию в ppm без калиброванных стандартов.

Для YAP это особенно существенно, поскольку непреднамеренные RE-ионы могут наследоваться от иттрийсодержащего сырья, а переходные металлы - от алюминийсодержащих компонентов и технологических источников. Работы по YAP:Mn демонстрируют, что Mn-центры дают собственные люминесцентные и дозиметрические отклики [6-8], а расчёты Ti-допированного YAP подтверждают появление локализованных уровней внутри запрещённой зоны [9]. Таким образом, «номинально чистый» YAP следует рассматривать не как идеальную систему Y-Al-O, а как широкозонную матрицу, способную спектроскопически выявлять присутствие следовых центров.

В оксидных матрицах такой спектроскопический контраст часто возникает именно в областях зарядового переноса и фундаментального возбуждения. После $O^{2-} \rightarrow$ примесь переноса заряда, фотоионизации или межзонного возбуждения валентная зона $\rightarrow$ зона проводимости созданные электронно-дырочные возбуждения могут локализоваться на примесных центрах или передавать им энергию [12]. Наши ВУФ-работы на YAG:Eu/Cr, YAG:Nd и GGG показывают, что примесные, краевые и дефектно-опосредованные каналы разделяются в спектрах возбуждения [14, 16, 17]; сходная роль межзонного и дефектного возбуждения наблюдалась в BaMgF₄ [15]. В настоящем YAP общая высокоэнергетическая структура каналов 352,6, 465, 523,6 и 794,6 нм согласуется с эффективным возбуждением через межзонный переход матрицы около 7,85 эВ и последующей передачей энергии на следовые центры, тогда как Cr³⁺-связанные каналы 724,4 и 749,4 нм демонстрируют выраженную селективность около 6,8-6,9 эВ. Именно совместное рассмотрение PL и PLE позволяет отличить следовой примесный центр от случайного спектрального совпадения.

Заключение

Совместный анализ люминесценции при 7,75 эВ и девяти спектров возбуждения при 300 К выявил сложный примесный отклик коммерческого номинально нелегированного кристалла YAP (100). Наиболее убедительными спектроскопическими признаками являются R-дублет Cr³⁺ при 722,7/725,0 нм и штарковская последовательность Nd³⁺ около 875,5, 884,4, 891,9 и 915-916 нм. Предлагаемые отнесения остальных УФ-, видимых и ближних ИК-групп имеют различную степень неоднозначности; присутствие большого числа различных примесных ионов по одному набору данных не утверждается.

Нормированные спектры разделяют близкую по форме группу 352,6/465/523,6/794,6 нм и красную пару 724,4/749,4 нм, преимущественно возбуждаемую при 6,8-6,9 эВ. Для последней получена корреляция 0,982. Двойные отношения при 6,889 эВ относительно 7,848 эВ достигают 4,68 и 3,54, что характеризует выраженную межканальную селективность. Сходство красных спектров и сдвиг около 462 см⁻¹ согласуются с возможным Cr³⁺-связанным вибронным вкладом около 750 нм, однако не исключают спектральных перекрытий.

Для каналов 352,6, 465, 523,6 и 794,6 нм общий максимум около 7,85 эВ интерпретируется как область эффективного межзонного возбуждения матрицы YAlO₃ с последующей передачей энергии на непреднамеренные примесные центры. Эта интерпретация согласуется с опубликованным при комнатной температуре прямым $E_g \approx 7,63$ эВ [13], но не основывается только на положении экспериментального максимума: поток Р66 сам имеет максимум вблизи 7,75 эВ [18], поэтому без независимой радиометрической проверки нельзя по форме PLE количественно определять ширину запрещённой зоны или эффективность переноса энергии. Лабораторный СМ 2203 не обеспечивает возбуждение в этой ВУФ-области (его рабочий диапазон начинается примерно с 220 нм, $\approx 5,64$ эВ), а в доступной области интенсивности возбуждения по-

сле монохроматора и чувствительности регистрационного канала оказалось недостаточно для надёжного обнаружения слабой люминесценции данного образца [19]. Следовательно, преимущество Р66 определяется сочетанием ВУФ-доступа, высокого потока на образце и специализированной системы регистрации. В целом работа показывает, что ВУФ-люминесцентная спектроскопия является эффективным методом выявления оптически активных следовых центров в номинально чистых широкозонных оксидах.

Благодарность

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP23488995).

Вклад авторов

А. Бақытқызы - обработка экспериментальных данных.

М. Токашева - основной вклад в оформление статьи, проведение эксперимента и обработка экспериментальных данных

Ж. Карипбаев - написание текста, списка литературы и утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

Г. Баубекова - проведение эксперимента.

А. Жунусбеков - подготовка экспериментального оборудования, организация и контроль сбора данных во время всего эксперимента.

А. Какимов - вклад в оформление статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них отсутствует какой-либо конфликт интересов, связанный с публикацией данной статьи.

Список литературы

1. C.-K. Duan, P.A. Tanner, V.N. Makhov, M. Kirm. *Vacuum ultraviolet spectra and crystal field analysis of $YAlO_3$ doped with Nd^{3+} and Er^{3+}* , Physical Review B 75, 195130 (2007). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.195130>
2. Y. Wang, P.D. Townsend. *Potential problems in collection and data processing of luminescence signals*, Journal of Luminescence 142, 202–211 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2013.03.052>
3. R. Kolesov, K. Xia, R. Reuter, R. Stöhr, A. Zappe, J. Meijer, P.R. Hemmer, J. Wrachtrup. *Optical detection of a single rare-earth ion in a crystal*, Nature Communications 3, 1029 (2012). <https://doi.org/10.1038/ncomms2034>
4. P.C. Guyett, D. Chew, V. Azevedo, L.C. Blennerhassett, C. Rosca, E. Tomlinson. *Optimizing SEM-EDX for fast, high-quality and non-destructive elemental analysis of glass*, Journal of Analytical Atomic Spectrometry 39(10), 2565–2579 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4JA00212A>
5. D.L. Nash. *Determination of trace amounts of rare-earth impurities in yttrium oxide*, Applied Spectroscopy 22(2) (1968). <https://doi.org/10.1366/000370268774383615>
6. D. Afanasyev, S. Ubizskii, Ya. Zhydashchevskyy, A. Luchechko, A.I. Popov, A. Suchocki. *Time-resolved pulsed OSL of ceramic YAP phosphors*, Integrated Ferroelectrics 196(1), 24–31 (2019). <https://doi.org/10.1080/10584587.2019.1591980>
7. S. Piskunov, I. Isakoviča, M. Putnina, A.I. Popov. *Ab initio calculations of the electronic structure for Mn^{2+} -doped $YAlO_3$ crystals*, Low Temperature Physics 46(12), p. 1160–1164 (2020). <https://doi.org/10.1063/10.0002468>
8. Ya. Zhydashchevskyy, N. Martynyuk, A.I. Popov, D. Sugak, P. Bilski, S. Ubizskii, M. Berkowski, A. Suchocki. *Thermally induced fading of Mn-doped YAP nanoceramics*, Journal of Physics: Conference Series 987, 012009 (2018). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/987/1/012009>
9. S. Piskunov, A. Gopejenko, V. Pankratov, I. Isakoviča, C.-G. Ma, M.G. Brik, M. Piasecki, A.I. Popov. *First principles calculations of atomic and electronic structure of $Ti^{3+}Al$ - and $Ti^{2+}Al$ -doped $YAlO_3$* , Materials 14(19), 5589 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14195589>

10. M. Suganya, K. Ganesan, P. Vijayakumar, S. Jakathamani, A.S. Gill, O. Annalakshmi, S.K. Srivastava, R.M. Sarguna, S. Ganesamoorthy. *Structural and optical properties of beta irradiated YAlO₃ single crystals*, Optical Materials 107, 110095 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110095>
11. Yu.V. Zorenko, A.S. Voloshinovskii, I.V. Konstankevych. *Luminescence of F⁺ and F centers in YAlO₃*, Optics and Spectroscopy 96, 532–537 (2004). <https://doi.org/10.1134/1.1719141>
12. P. Dorenbos. *Charge transfer bands in optical materials and related defect level location*, Optical Materials 69, 8–22 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.03.061>
13. L.I. Bulyk, A.K. Somakumar, H. Przybylińska, P. Ciepielewski, Yu. Zorenko, Ya. Zhydachevskyy, I. Kudryavtseva, V. Gorbenko, A. Lushchik, M.G. Brik, Y. Syrotych, S. Witkiewicz-Łukaszek, A. Fedorov, A. Suchocki. *Influence of high pressure on Ce³⁺ luminescence in LuAlO₃ and YAlO₃ single crystals and single crystalline layers*, Journal of Luminescence 252, 119276 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119276>
14. A.M. Zhunusbekov, Z.T. Karipbayev, A. Tolegenova, K.K. Kumarbekov, E.E. Nurmoldin, M.M. Baizhumanov, A. Kotlov, A.I. Popov. *Comparative VUV synchrotron excitation study of YAG and YAG ceramics*, Crystals 14(10), 897 (2024). <https://doi.org/10.3390/cryst14100897>
15. A.M. Zhunusbekov, A.V. Strelkova, Z.T. Karipbayev, K.K. Kumarbekov, A. Akilbekov, R.N. Kassymkhanova, M.T. Kassymzhanov, Y. Smortsova, A.I. Popov. *Luminescence investigation of BaMgF₄ ceramics under VUV synchrotron excitation*, Crystals 15(2), 127 (2025). <https://doi.org/10.3390/cryst15020127>
16. G. Baubekova, G. Tursumbayeva, R. Assylbayev, Z.T. Karipbayev, E. Shablonin, A. Kotlov, A. Akilbekov, A.I. Popov, A. Lushchik, *Changes in optical and luminescent characteristics of Y₃Al₅O₁₂:Nd³⁺ single crystals caused by the irradiation with energetic xenon ions*, Journal of Luminescence 295, 121933 (2026). <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2026.121933>
17. Z.T. Karipbayev, G.M. Aralbayeva, K.K. Kumarbekov, A.B. Kakimov, A.M. Zhunusbekov, A. Akilbekov, M.G. Brik, M. Konuhova, S. Ubizskii, Y. Smortsova, Y. Suchikova, S. Djurković, S. Piskunov, A.I. Popov. *Effects of 147 MeV Kr ions on the structural, optical and luminescent properties of Gd₃Ga₅O₁₂*, Crystals 16(1), 40 (2026). <https://doi.org/10.3390/cryst16010040>
18. Y. Smortsova, O. Chukova, M. Kirm, V. Nagirnyi, V. Pankratov, A. Kataev, A. Kotlov. *The P66 time-resolved VUV spectroscopy beamline at PETRA III storage ring of DESY*, Journal of Synchrotron Radiation 32, 1539–1548 (2025). <https://doi.org/10.1107/S1600577525007568>
19. SOLAR. *CM2203 technical specifications*. Available at: <https://solar.by/en/cm2203-oil/> (accessed 07.09.2026).
20. D. Totsuka, T. Yanagida, M. Sugiyama, J. Pejchal, Y. Fujimoto, Y. Yokota, A. Yoshikawa. *Investigations of optical and scintillation properties of Tm³⁺-doped YAlO₃*, Optical Materials 34, 627–631 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2011.09.008>
21. M. Akatsuka, D. Nakauchi, T. Kato, N. Kawaguchi, T. Yanagida. *Optical and scintillation properties of YAlO₃ doped with rare-earth ions emitting near-infrared photons*, Sensors and Materials 32, 1373–1380 (2020). <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2743>
22. C. Zhang, Y. Chen, S. Ma, H. Fan, Y. Yu, Z. Hu, N. Ye, J. Wang, Y. Wu. *Thermal and fluorescence spectrum properties of Dy₃ crystal influenced by doping concentrations*, Optical Materials 138, 113633 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.113633>
23. C.F. Tipaldi, J. Gabrusenoks, G. Chikvaidze. *Vibrational spectroscopy of YAlO₃*, Physica Status Solidi B 261, 2300481 (2024). <https://doi.org/10.1002/pssb.202300481>

М. Токашева, А. Бақытқызы, Ж. Карипбаев*, Г. Баубекова, А. Жунусбеков, А. Какимов

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,

г. Астана, Казахстан

*(E-mail: tokasevimiramgul@gmail.com; aizat.bakytqyzy.1@gmail.com; karipbayev_zht_1@enu.kz; *baubekova_gm@enu.kz; zhunusbekov_am@enu.kz; kakimov_ab_3@enu.kz)*

Номиналды қоспаланбаған YAlO_3 кристалының қоспалық люминесценциясы және селективті вакуумдық-ультракүлгін қозуы

Аңдатпа. 300 К температурада 7,75 эВ энергиясымен қоздырылған номиналды қоспаланбаған YAlO_3 монокристалының сәуле шығару спектрі және тоғыз эмиссия арнасының қозу спектрлері зерттелді. Негізгі өлшеулер DESY орталығындағы PETRA III синхротрондық көзінің P66 арнасында жүргізілді. 352,6, 465, 523,6 және 794,6 нм арналарында шамамен 7,85 эВ маңында ортақ максимум байқалады; ол YAlO_3 матрицасындағы тиімді зонааралық қозу және кейінгі энергияның іздік қоспа орталықтарына берілуі ретінде түсіндіріледі. Бұл интерпретация YAP үшін бөлме температурасында жарияланған тікелей тыйым салынған аймақ ені шамамен 7,63 эВ болатын деректермен үйлеседі, бірақ фотон ағыны бойынша тәуелсіз тексерілген түзетусіз максимумның орны мен амплитудасы E_g немесе энергия берілу тиімділігінің сандық өлшемі ретінде пайдаланылмайды. 724,4 және 749,4 нм арналар 6,8–6,9 эВ аймағында басым қозады және олардың корреляция коэффициенті 0,982. 722,7/725,0 нм дублеті Cr^{3+} иондарына, ал 875,5, 884,4, 891,9 нм сызықтары және 915–916 нм әлсіз тобы Nd^{3+} иондарының Штарк құрылымына сәйкес келеді. CM 2203 зертханалық спектрофлуориметрінде қолжетімді конфигурацияда осы номиналды қоспаланбаған үлгінің люминесценциясын сенімді тіркеу мүмкін болмады. P66 арнасы CM 2203-пен салыстырғанда зонааралық ВУФ-қозу аймағына тікелей қолжетімділік береді және 7,75 эВ кезінде үлгіде шамамен 4×10^{12} фотон/с ағынды қамтамасыз етеді. Нәтижелер іздік жоспарланбаған қоспаларды анықтауда синхротрондық ВУФ-люминесценттік спектроскопияның артықшылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: YAlO_3 ; қоспалық люминесценция; вакуумдық ультракүлгін; синхротрондық сәулелену; қозу спектрлері; Cr^{3+} ; Nd^{3+} .

M. Tokasheva, A. Bakytzyzy, Zh. Karipbayev*, G. Baubekova, A. Zhunusbekov, A. Kakimov

L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

*(E-mail: tokasevimiramgul@gmail.com; aizat.bakytzyzy.1@gmail.com; karipbayev_zht_1@enu.kz; *baubekova_gm@enu.kz; zhunusbekov_am@enu.kz; kakimov_ab_3@enu.kz)*

Impurity luminescence and selective vacuum-ultraviolet excitation of a nominally undoped YAlO_3 crystal

Abstract. The emission spectrum of a nominally undoped YAlO_3 single crystal excited at 7.75 eV and excitation spectra monitored at nine emission wavelengths were analysed at 300 K. The main measurements were performed at the P66 beamline of PETRA III (DESY). The 352.6, 465, 523.6 and 794.6 nm channels show a common maximum near 7.85 eV, which is interpreted as efficient host band-to-band excitation followed by energy transfer to trace impurity centres. This interpretation is consistent with a reported room-temperature direct band gap of about 7.63 eV for YAP, while the peak position and amplitude are not used as an independent quantitative determination of the band gap or transfer efficiency without verified photon-flux correction. The 724.4 and 749.4 nm channels are preferentially excited at 6.8–6.9 eV and have a Pearson correlation coefficient of 0.982. The 722.7/725.0 nm doublet is assigned to Cr^{3+} , whereas the 875.5, 884.4 and 891.9 nm lines together with a weak 915–916 nm group are consistent with the Stark structure of Nd^{3+} . Laboratory measurements with a CM 2203 spectrofluorometer did not yield reliably detectable luminescence from this nominally undoped sample under the available configuration. Unlike CM 2203, P66 provides direct access to the VUV band-to-band excitation region and a photon flux of about 4×10^{12} photons s^{-1} at the sample at 7.75 eV. The results demonstrate the advantage of synchrotron VUV luminescence spectroscopy for detecting weak unintentional impurity centres.

Keywords: YAlO_3 ; impurity luminescence; vacuum ultraviolet; synchrotron radiation; excitation spectra; Cr^{3+} ; Nd^{3+} .

Сведения об авторах:

А. Бақытқызы – научный сотрудник научно-исследовательского института функциональных материалов, нанотехнологий и компьютерного моделирования, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, ул. Кажымукана, 13, Астана 010008, Казахстан.

М. Токашева - докторант 3-го курса по специальности «8D05323-Техническая физика», Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, ул.Кажымукана, 13, Астана, 010000, Казахстан.

Ж. Карипбаев - автор для корреспонденции, PhD, ассоциированный профессор кафедры технической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Астана, Кажымукана, 13, 010000, Казахстан.

Г. Баубекова - PhD, ассоциированный профессор кафедры технической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, ул.Астана, Кажымукана, 13, 010000, Казахстан.

А. Жунусбеков - ассоциированный профессор кафедры технической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, ул.Астана, Кажымукана, 13, 010000, Казахстан.

А. Какимов - PhD, преподаватель кафедры технической физики, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, ул.Астана, Кажымукана, 13, 010000, Казахстан.

A. Bakytkyzy - Research Institute of Functional Materials, Nanotechnologies and Computer Modeling, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymukan Str. 13, Astana 010008, Kazakhstan.

M. Tokasheva - PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.

Zh. Karipbayev - the corresponding author, PhD, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.

G. Baubekova - PhD, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.

A. Zhunusbekov - PhD, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.

A. Kakimov - PhD, Teacher, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.

А. Бақытқызы – Функционалдық материалдар, нанотехнологиялар және компьютерлік модельдеу ғылыми-зерттеу институтының ғылыми қызметкері, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көшесі, 13, Астана 010008, Қазақстан.

М. Токашева - «Техникалық физика» кафедрасының 3-ші курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қажымұқан, 13, 010000, Қазақстан.

Ж. Карипбаев - хат-хабар авторы, «Техникалық физика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қажымұқан 13, 010000, Қазақстан.

Г. Баубекова - PhD, «Техникалық физика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қажымұқан 13, 010000, Қазақстан.

А. Жунусбеков - PhD, «Техникалық физика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қажымұқан 13, 010000, Қазақстан.

А. Какимов - PhD, «Техникалық физика» кафедрасының оқытушысы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қажымұқан 13, 010000, Қазақстан.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).