

УДК 546.02:538.958

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИНИТРИДА АЛЮМИНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗОМ

© 2024 г. А. В. Ищенко^{1, *}, Н. С. Ахмадуллина², Д. А. Пастухов¹, И. И. Леонидов³, В. П. Сиротинкин², А. С. Лысенков², О. Н. Шишилов⁴, Ю. Ф. Каргин²

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,
Ленинский пр., 49, Москва, 119334 Россия

³Институт химии твердого тела УрО Российской академии наук,
ул. Первомайская, 91, Екатеринбург, 620990 Россия

⁴МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий
пр. Вернадского, 86, Москва, 119571 Россия

e-mail: a-v-i@mail.ru

Поступила в редакцию 21.11.2023 г.

После доработки 23.04.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

В статье приведены результаты по синтезу, фазовому составу и оптическим свойствам оксинитрида алюминия $\text{Al}_5\text{O}_6\text{N}$, легированного ионами железа в широком диапазоне концентраций: от 0.01 до 5.0 ат. % (относительно алюминия). Все образцы, полученные обжигом смесей Al_2O_3 , AlN и Fe_2O_3 при температуре 1750°C в токе азота, представляют собой практически однофазный $\gamma\text{-AlON}$ с незначительными примесями нитрида алюминия и неидентифицированных фаз. Ширина запрещенной зоны E_g в AlON:Fe лежит в диапазоне 5.76–5.88 эВ в зависимости от концентрации железа. Обнаружены люминесценция AlON:Fe , обусловленная собственными дефектами и примесными центрами свечения, и зависимость интенсивности люминесценции полос свечения от концентрации Fe в AlON . Присутствие железа в AlON приводит к увеличению оптического поглощения и снижению интенсивности собственной люминесценции.

Ключевые слова: оксинитрид алюминия AlON , железо, фазовый состав, оптические свойства, люминесценция

DOI: 10.31857/S0002337X24030083, **EDN:** LKTIUA

ВВЕДЕНИЕ

Оксинитрид алюминия ($\text{Al}_5\text{O}_6\text{N}$, или AlON) известен как многофункциональный материал, обладающий высокой термической, химической и механической стабильностью [1]. Он часто используется в качестве оптического материала, в частности матриц люминофоров, поскольку может быть сравнительно легко легирован ионами переходных и редкоземельных металлов (РЗМ) и представляет интерес для источников света от УФ- до ближнего ИК-диапазона [2–7]. В литературе представлены результаты исследований оксинитрида алюминия $\gamma\text{-AlON}$, легированного ионами Eu^{2+} [5], Ce^{3+} [8], Tb^{3+} [7], Er^{3+} [9], Yb^{2+} [2], Cr^{3+} [10] и Mn^{2+} [4]. Активно изучаются оптические свойства AlON с двойным легировани-

ем, например, $\text{Eu}^{2+}/\text{Ce}^{3+}$ [11, 12], $\text{Eu}^{2+}/\text{Tb}^{3+}$ [12, 13] и $\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ [12].

На сегодняшний день для оксинитрида алюминия, легированного перечисленными ионами, описаны особенности синтеза, пределы растворимости легирующих ионов и фазовый состав при превышении этих пределов [6, 14–16]. В случае РЗМ примесные фазы в основном представляют собой алюминаты $\text{M}^{\text{III}}\text{Al}_{11}\text{O}_{18}$ и $\text{M}^{\text{II}}\text{Al}_{12}\text{O}_{19}$ [17]. Несмотря на достаточно большой объем информации в литературе по оксинитриду алюминия, содержащему РЗМ, сведения о свойствах AlON , легированного переходными металлами, практически отсутствуют. Недавно нами были начаты исследования оксинитридов $\text{Al}_5\text{O}_6\text{N:Ti}$ [18] и $\text{Al}_5\text{O}_6\text{N:Co}$ [19], в частности, ки-

нетики образования, фазового состава и оптических свойств.

В данной работе мы продолжаем исследование оксинитрида алюминия, легированного ионами 3d-металлов, а именно, для случая железа. Актуальность исследования дополнительно обусловлена тем, что в работах [18, 19] высказано предположение об участии ионов железа в процессах люминесценции в AlON в красной и ближней ИК-областях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные вещества. В качестве исходных компонентов для синтеза образцов AlON, легированных железом, использовали изопропоксид алюминия $\text{Al}(\text{O}i\text{Pr})_3$ квалификации “х. ч.”, оксид железа Fe_2O_3 (“х. ч.”), моногидрат лимонной кислоты (“х. ч.”) и нитрид алюминия AlN, синтезированный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в ИСМ РАН (г. Черноголовка)¹. В качестве растворителей использовали дистиллированную воду и изопропанол квалификации “х. ч.” без дополнительной очистки. Оксид алюминия получали золь-гель-методом из изопропоксида алюминия [18].

Синтез AlON:Fe. Образцы AlON:Fe были приготовлены методом высокотемпературного обжига смесей порошков оксида алюминия, нитрида алюминия и оксида железа (III). Смесей готовились путем интенсивного перетирания с ацетоном в агатовой ступке с последующей сушкой при 120°C на воздухе. Смесей компактировались, полученные таблетки обжигали в токе азота под давлением в 1 атм при температуре 1750°C в течение 2 ч. Подъем температуры вели со скоростью ~400°C/ч, после обжига смеси давали остыть естественным путем в токе азота. Описанным способом были приготовлены образцы с содержанием железа 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.5 и 5.0 ат. % (относительно алюминия), которые обозначены, например, как AlON:0.01Fe, или кратко 0.01Fe.

Рентгенофазовый анализ. Фазовый состав исходных порошков и полученных образцов устанавливали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Ultima IV (CuK_α -излучение).

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КРС). Регистрация КРС-спектров осуществлена с помощью конфокального микроскопа

Renishaw inVia Reflex с конфигурацией, описанной ранее [18]. В качестве источника возбуждения использовался Nd:YAG-лазер Renishaw с длиной волны 532.1 нм при мощности около 3 мВт на образце.

Спектры диффузного отражения. Спектры регистрировали на спектрофотометре Shimadzu UV-2450 с использованием интегрирующей сферы ISR-2200 в диапазоне длин волн 200–850 нм.

Спектры импульсной катодолуминесценции (ИКЛ). Спектры измеряли на установке КЛАВИ-Р [20], оборудованной импульсным ускорителем РАДАН-ЭКСПЕРТ с энергией 150 кэВ, длительностью импульса 2 нс, плотностью тока 150 А/см². Спектры ИКЛ регистрировали ПЗС-сенсором Sony ILX511 с электронно-оптическим преобразователем в диапазоне 350–850 нм при комнатной температуре со временем интегрирования 20 мс.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фазовый состав AlON:Fe. Образцы AlON:Fe были охарактеризованы данными порошковой рентгеновской дифракции. Дифрактограммы представлены на рис. 1 в линейном и логарифмическом масштабах. Индексирование дифрактограмм полученных образцов показывает, что основные рефлексы соответствуют фазе γ -AlON (PDF2, карточка [48-0686]) с небольшой примесью нитрида алюминия (PDF2, карточка [65-3409]), который является основной примесной фазой. Дополнительно во всех образцах присутствует неидентифицированная фаза (НФ), содержащаяся в незначительных количествах (отмечена на рис. 1 как НФ1). Общее содержание примеси AlN и фазы НФ1 в образцах не превышает 3–5 об. %.

Добавка в исходную смесь оксида железа даже в минимальной концентрации (0.01 ат. %) при синтезе γ -AlON позволяет исключить формирование примеси α - Al_2O_3 (PDF2, карточка [82-1399]), присутствие которой наблюдается в образце AlON:0Fe (рис. 1). Подобный результат зафиксирован при синтезе AlON, легированного титаном [18] и кобальтом [19].

При увеличении содержания оксида железа в реакционной смеси до 0.2 ат. % и более на дифрактограммах, кроме примеси AlN и фазы НФ1, наблюдается появление дополнительных пиков (фаза НФ2, рис. 1б), однозначная идентификация которых вызывает затруднения. Их

¹ Технический порошок нитрида алюминия для клеев и герметиков; содержание основного вещества: не менее 96%.

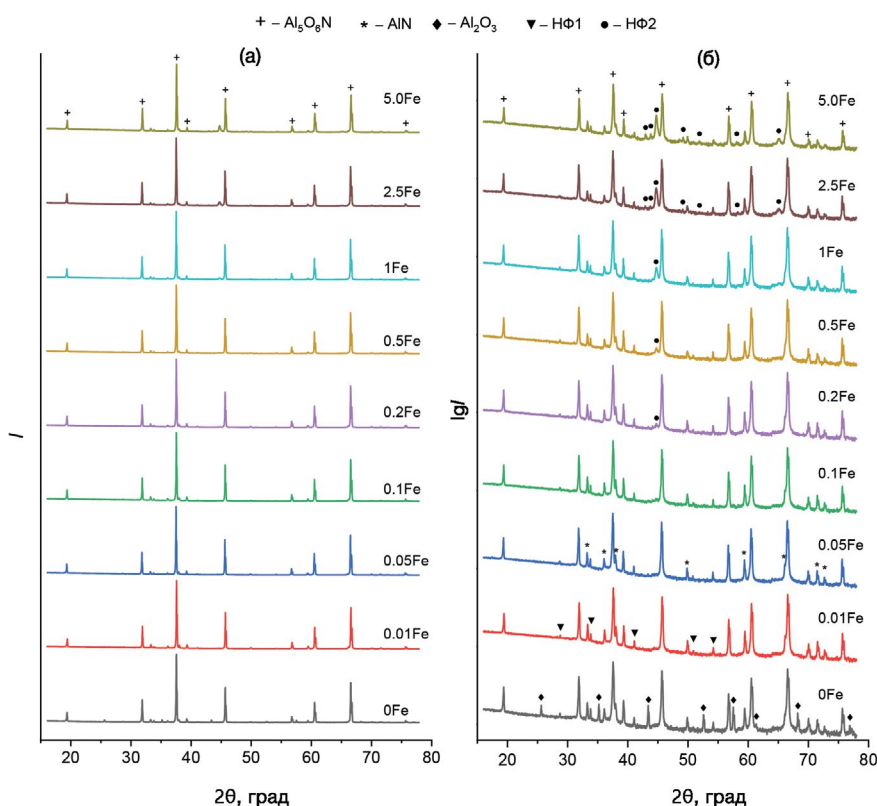


Рис. 1. Дифрактограммы образцов в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах AlON:Fe (НФ1 и НФ2 — неидентифицированные фазы).

интенсивность относительно пиков оксинитрида алюминия монотонно возрастает с увеличением содержания оксида железа от 0.2 до 5 ат. %, что позволяет предположить в качестве их источника железосодержащие фазы. В частности, описываемые пики могут быть отнесены к алюминату железа FeAl_2O_4 (PDF-2, карточка [03-0894]) либо к кубической модификации нитрида алюминия (PDF-2, карточка [46-1200]), поскольку обе упомянутые фазы имеют интенсивные пики при $\sim 44.8^\circ$ и 65.2° . Близость положения этих рефлексов к $\alpha\text{-Fe}$ ($2\theta = 44.67^\circ, 65.018^\circ$, карточка [06-0696]) вряд ли может быть связана с его образованием, так как более вероятна возможность образования твердого раствора железа в нитриде алюминия AlN:Fe ($\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x\text{N}$ с $0 \leq x \leq 0.136$ [21]). Кроме того, изоструктурность $\gamma\text{-AlON}$ и герценита FeAl_2O_4 , имеющих структуру шпинели (пр. гр. $Fd\bar{3}m$) с близкими параметрами кубической элементарной ячейки (7.950 и 8.12 Å соответственно), предопределяет возможность их взаимной растворимости с образованием твердых растворов.

Параметры кристаллической решетки основной фазы AlON в синтезированных образцах были уточнены с помощью пакета Profex [22] методом Ритвельда. При аппроксимации дифрактограмм критерий χ^2 не превышал значения 2.5 без учета пиков от неидентифицированных фаз НФ1 и НФ2. В результате оценки выявлено, что при увеличении концентрации железа в исходной смеси постоянная решетки оксинитрида алюминия закономерно уменьшается с 7.950 до 7.945 Å (рис. 2). Образец AlON:0Fe не подчиняется данной зависимости предположительно из-за отличий в стехиометрическом составе, на что указывает присутствие фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Уменьшение постоянной решетки при увеличении содержания железа может быть связано с тем, что ионы железа занимают вакансии алюминия V_{Al} , а не замещают ионы Al^{3+} . В работе [23] в рамках модели кристаллической структуры $\gamma\text{-AlON}$ с полностью заполненными анионными позициями (модель постоянных анионов) показано, что заселенность позиций алюминия заметно ниже 1, причем большая часть дефектов V_{Al} при-

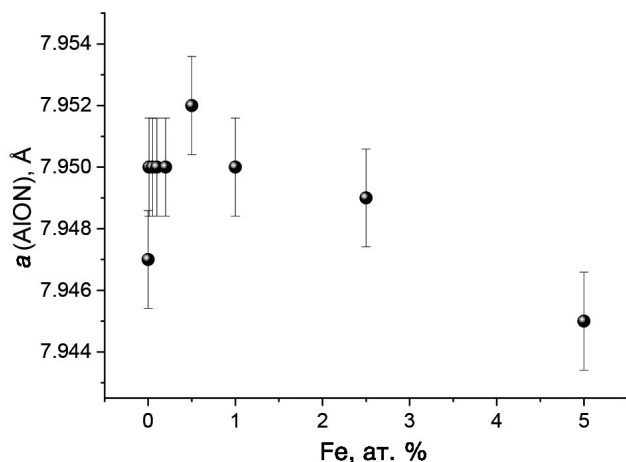


Рис. 2. Зависимость постоянной решетки фазы AlON от концентрации железа.

ходится на октаэдрические позиции $16d$, которые наиболее выгодны для ионов железа при их внедрении в шпинельную структуру. Появление дополнительных катионов в этих позициях, возможно, приводит к уменьшению постоянной решетки, что, однако, требует дополнительных исследований.

КРС-спектроскопия. В КРС-спектрах AlON:Fe с концентрацией железа 0.01, 0.1, 1 и 5 ат. % (рис. 3) наблюдаются интенсивные полосы с максимумами при 230 и 311 см^{-1} , несколько перекрывающихся полос при 260, 370, 416, 467, 510, 540, 583 см^{-1} и слабая широкая полоса в диапазоне 700–840 см^{-1} .

Зарегистрированные КРС-спектры образцов нетипичны для спектров AlON, представленных в литературе [24]. Так, в спектрах AlON:Fe отсутствуют широкие интенсивные полосы в области 600–1000 см^{-1} . Однако при этом обнаруживаются узкие линии с максимумами при 613, 658, 670, 894 и 910 см^{-1} , относящиеся к колебаниям решетки AlN структурного типа вюрцита [25], присутствующего в виде примесной фазы во всех образцах. Линии колебаний AlN максимальной интенсивности проявляются в спектре образца AlON:0.1Fe. Однако данное обстоятельство не является свидетельством повышенного содержания фазы AlN, так как спектр КРС образца AlON:0.1Fe с хорошим соотношением сигнал/шум удалось успешно зарегистрировать лишь в области поверхности с повышенным содержанием примеси AlN, которая, как было показано ранее, присутствует в AlON в виде зерен размером до нескольких микрон [19].

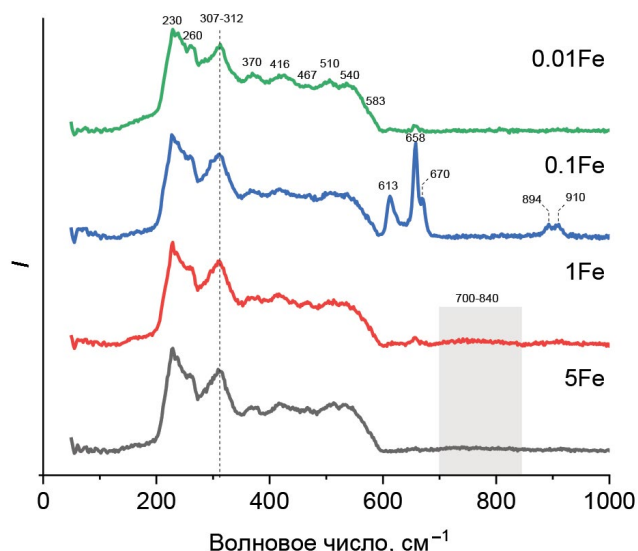


Рис. 3. Спектры КРС образцов AlON:Fe с содержанием железа 0.01, 0.1, 1.0 и 5.0 ат. %.

Согласно результатам [26], интенсивная полоса с максимумом 307–312 см^{-1} типична для AlON и относится к деформационной моде кристаллической решетки типа “растяжение–сжатие” T_{2g} . Слабая полоса в области 700–840 см^{-1} отнесена к симметричным растяжениям тетраэдров AlO_4 . Идентификация остальных наблюдаемых полос является предметом отдельного исследования. Профили КРС-спектров показывают, что образцы AlON:Fe изоструктурны ранее исследованным AlON:Ti [18] и AlON:Co [19] с содержанием легирующих ионов до 5 ат. %.

Оптические свойства. Спектры диффузного отражения образцов AlON:Fe (рис. 4а) показывают, что при увеличении концентрации железа в AlON коэффициент отражения образцов уменьшается с 58 до 24% на длине волны 400 нм по экспоненциальному закону (рис. 4в).

Спектры поглощения (рис. 4б) AlON:Fe получены расчетным путем с помощью выражения Кубелки–Мунка [27] $F(R) = (1-R)^2/(2R)$, где $F(R)$ — функция Кубелки–Мунка, пропорциональная показателю поглощения, R — коэффициент отражения. При увеличении концентрации железа наблюдается рост величины поглощения в диапазоне 230–850 нм. Для всех образцов наблюдается полоса поглощения с максимумом 255 нм, которая типична для AlON [18, 19] и связана с электронными переходами в дефектах типа V_{Al} [28].

Наличие в спектрах поглощения (рис. 4б) ярко выраженного края фундаментального поглощения позволяет оценить оптическую шири-

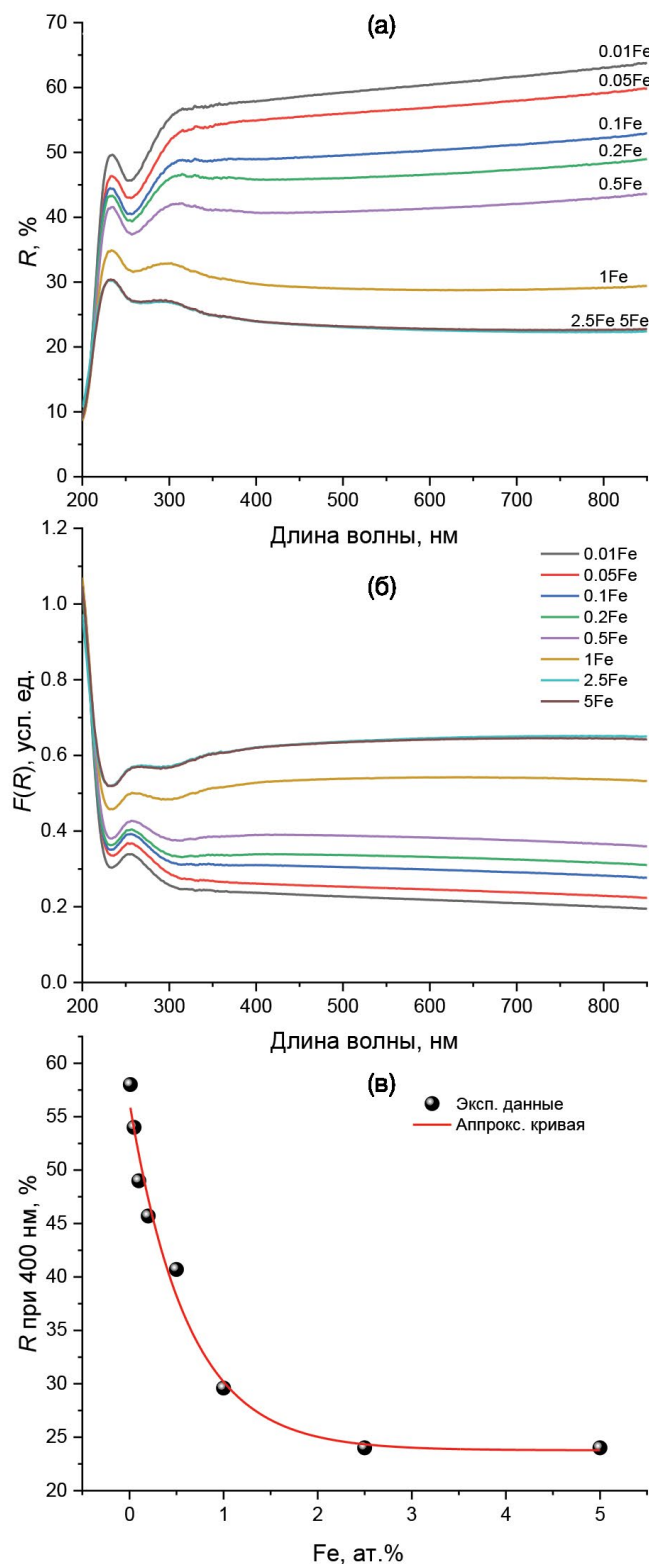


Рис. 4. Спектры пропускания (а), поглощения (б) и зависимость коэффициента отражения на длине волны 400 нм от концентрации железа (в) в образцах AlON:Fe.

ну запрещенной зоны методом Тауца [29]. Для этого спектры поглощения были перестроены в координатах Тауца (рис. 5а) в соответствии с выражением $(ah\nu)^{1/n} = A(h\nu - E_g)$, где E_g — ширина запрещенной зоны, h — постоянная Планка, ν — частота, a — коэффициент поглощения, A — коэффициент пропорциональности, n — показатель степени, равный $\frac{1}{2}$ для прямых разрешенных электронных переходов, характерных для AlON [19, 30]. На спектрах, построенных в координатах Тауца (рис. 5а), обнаруживается участок в области 5.5–6.5 эВ, который может быть аппроксимирован прямой линией до пересечения с осью абсцисс для определения E_g . Однако описанная выше процедура для AlON может приводить к значительной погрешности при оценке E_g вследствие наличия полосы поглощения с максимумом 255 нм и значительной фоновой составляющей. Для корректной оценки E_g методом Тауца была использована методика [18, 19], в которой для устранения влияния описанных выше факторов проводилось вычитание фоновой линии из спектров поглощения. Пример оценки E_g без коррекции и с коррекцией приведен на рис. 5в, 5г для образца AlON:5Fe. Для нескорректированных спектров AlON:5Fe значение E_g равно 5.61 эВ для скорректированных 5.86 эВ.

Значения E_g , вычисленные для всех образцов, представлены в графическом виде на рис. 5б. Видно, что в диапазоне концентраций железа 0.01–1.0 ат. % величина E_g лежит в диапазоне 5.76–5.82 эВ. При дальнейшем увеличении концентрации железа E_g возрастает до 5.87–5.88 эВ.

Спектры ИКЛ образцов AlON:Fe (рис. 6а) представляют собой широкие полосы люминесценции с максимумами при 495, 595 и 760 нм. Узкие пики в области 350–500 нм принадлежат свечению молекулярного азота N_2 в воздухе при воздействии катодного пучка. Самой интенсивной эмиссией обладает образец с минимальным содержанием железа AlON:0.01Fe.

Анализ спектров ИКЛ осуществлен путем аппроксимации экспериментальных данных, которая проводилась одновременно по всем экспериментальным спектрам с единым критерием χ^2 функцией, состоящей из четырех гауссовых компонент с одинаковыми положением максимумов и полушириной для всех спектров. Интенсивность каждой компоненты подобрана индивидуально для всех спектров ИКЛ. Результат аппроксимации приведен на рис. 6б на примере образца AlON:0.01Fe. Обозначение полос аналогично тем, что приведены в работах

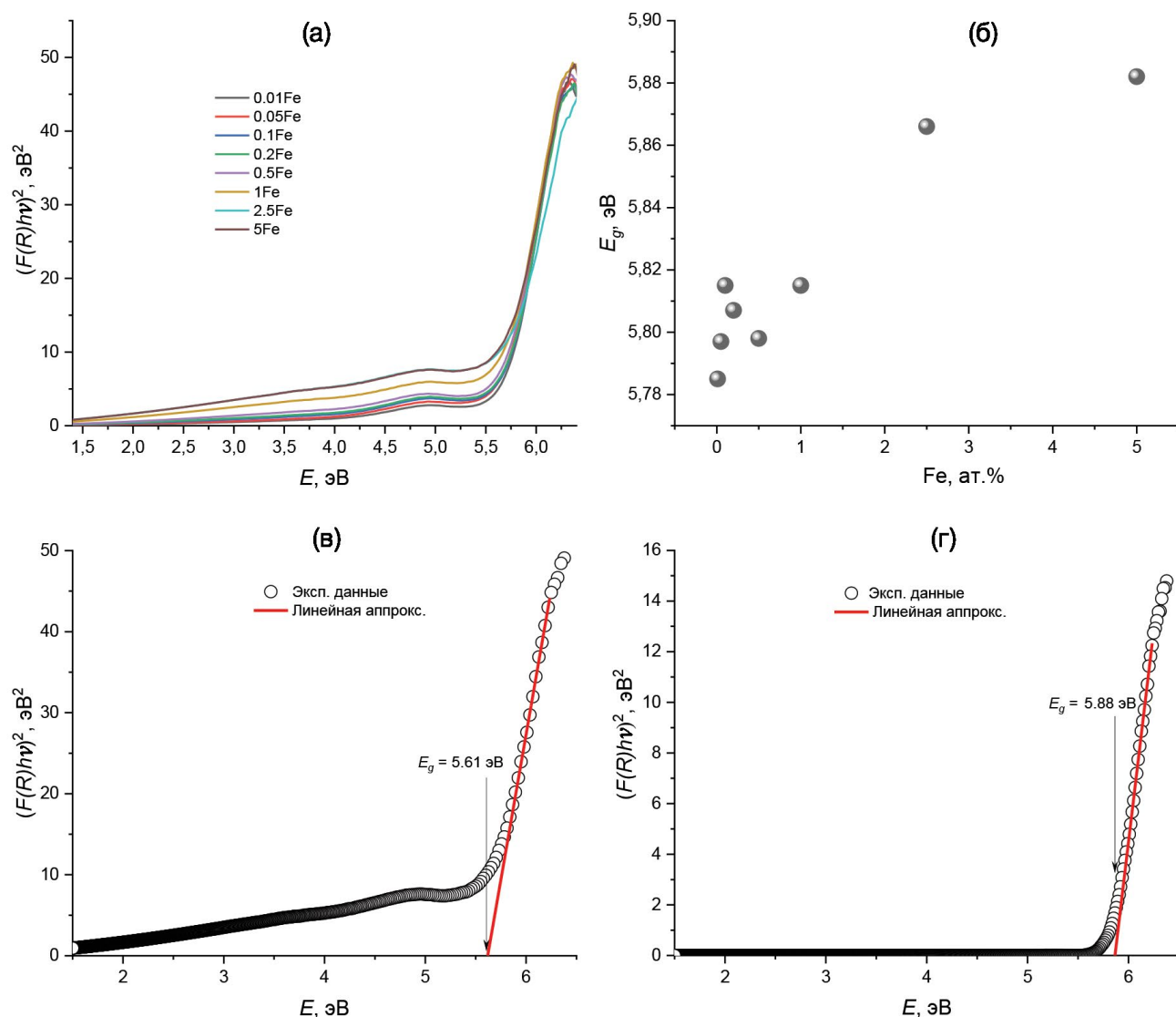


Рис. 5. Спектры поглощения в координатах Тауца (а), зависимость E_g от концентрации Fe (б) образцов AlON:Fe и пример оценки E_g для образца AlON:5Fe со спектрами без коррекции (в) и с коррекцией (г).

[18, 19]: B1, B2, B3, B4 и B5. В спектрах AlON:Fe обнаружены четыре полосы: B1, B2, B3 и B5 с максимумами 3.11 (398), 2.52 (492), 2.06 (602) и 1.68 эВ (738 нм) и полуширинами 0.55, 0.61, 0.14 и 0.38 эВ соответственно. Полосы B1 и B4 относятся к излучательным переходам в AlN [19]. Полоса B4 в спектрах AlON:Fe не зарегистрирована. Являющаяся одной из самых интенсивных полоса B2 в AlON принадлежит к излучению дефектов типа $[V'''_{\text{Al}}-3\text{O}^{\bullet}_{\text{N}}]$. Полосы B3 и B5 были ранее отнесены к излучению примесных ионов в AlON, таких как Fe, Mn, Ti [18, 19]. Для выяснения природы полос были построены зависимости их интенсивности от концентрации железа (рис. 6в). Интенсивность полосы B5 в отличие от полос B1–B3

достигает максимума при 0.2 ат. % Fe и последовательно снижается в диапазоне концентраций 0.2–5 ат. %. Такое поведение типично для концентрационной зависимости интенсивности примесной люминесценции, что может указывать на вовлеченность ионов железа в процессы переноса заряда, связанные с полосой B5. Резкое снижение интенсивности свечения всех полос люминесценции при концентрации Fe более 0.2–0.5 ат. % (рис. 6в) связано с образованием примесной железосодержащей фазы и ростом оптического поглощения. Полоса B3 может принадлежать к люминесценции ионов Mn, что, однако, требует экспериментальной проверки.

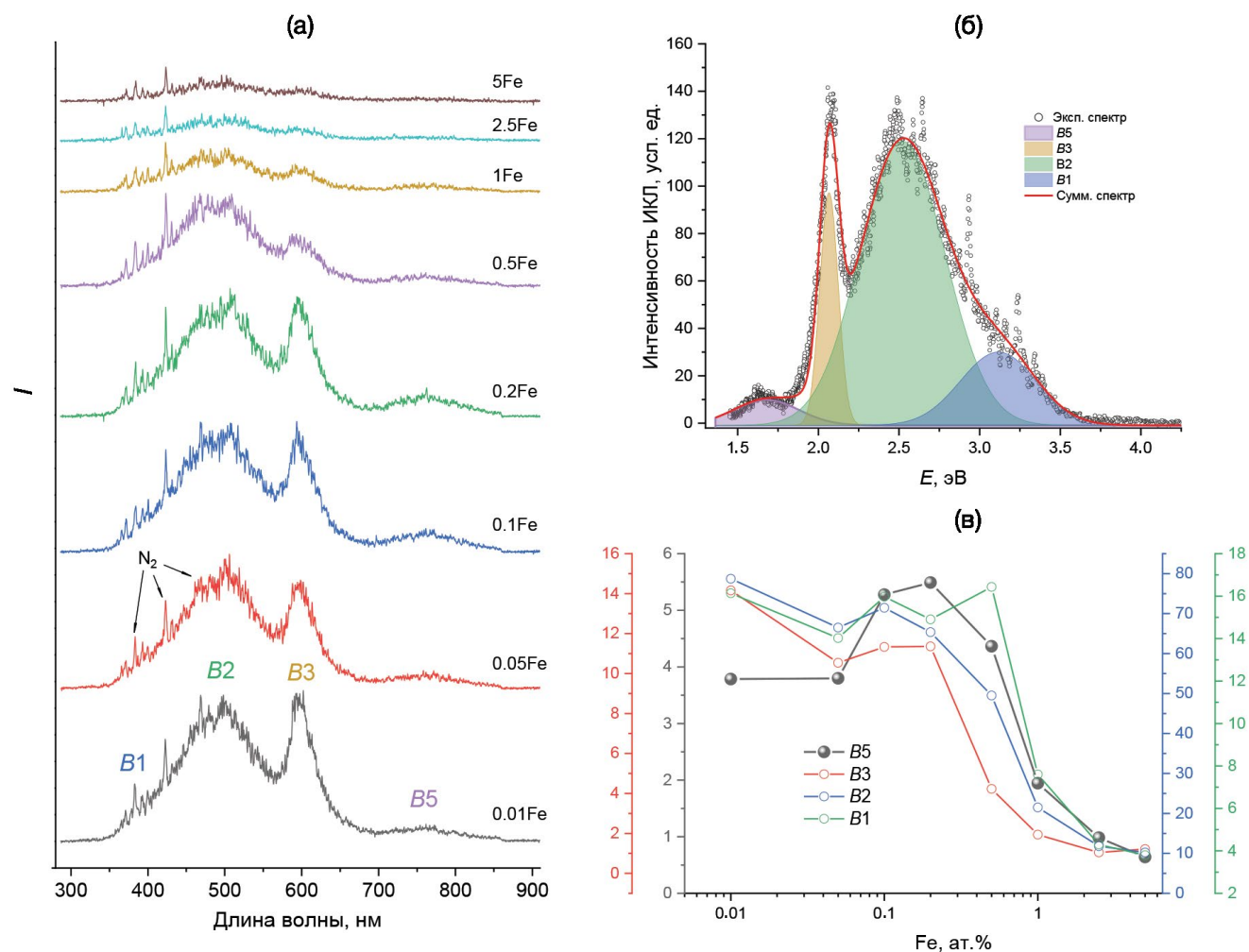


Рис. 6. Спектры ИКЛ образцов AlON:Fe (а), аппроксимация экспериментального спектра ИКЛ на примере образца AlON:0.01Fe четырьмя гауссианами (б) и зависимости интенсивности ИКЛ (оси ординат отмечены цветом в соответствии с цветом графика) полос свечения B1, B2, B3 и B5 от концентрации Fe в AlON (в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Образцы AlON, легированные 0.01–5 ат. % железа, синтезированы методом высокотемпературного обжига смесей порошков Al_2O_3 , полученного золь–гель-методом из изопропоксида алюминия, нитрида алюминия и оксида железа (III). Рентгенофазовый анализ показал наличие основной фазы γ -AlON с примесью AlN и небольшого количества неидентифицированной фазы для всех синтезированных образцов. Дополнительная железосодержащая фаза появляется при концентрациях железа 0.2 ат. % и более.

Наличие ионов железа в AlON не приводит к появлению новых полос поглощения в оптическом диапазоне спектра, однако способствует увеличению величины поглощения. Ширина запрещенной зоны E_g AlON также зависит от

концентрации железа и лежит в диапазоне 5.76–5.88 эВ. В спектрах ИКЛ AlON:Fe обнаружены полосы свечения, которые относятся к люминесценции примеси AlN, собственных дефектов типа $[V'''_{\text{Al}}-3O\cdot_N]$ и примесной люминесценции, предположительно, ионов Mn. Полос люминесценции с максимумами 398 (3.11), 492 (2.52) и 602 нм (2.06 эВ). Легирование AlON ионами железа приводит к тушению полос люминесценции с максимумами 398 (3.11), 492 (2.52) и 602 нм (2.06 эВ). Максимальная интенсивность полосы при 738 нм (1.68 эВ) достигается при 0.2 ат. % Fe. Резкое снижение интенсивности свечения всех полос люминесценции при концентрации Fe более 0.2–0.5 ат. % связано с образованием примесной железосодержащей фазы и ростом оптического поглощения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российско-го научного фонда, проект № 22-23-00958.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Mittal D., Hostaša J., Silvestroni L., Esposito L., Mohan A., Kumar R., Sharma S.K. Tribological Behaviour of Transparent Ceramics: A Review // J. Eur. Ceram. Soc. 2022. V. 42. № 14. P. 6303–6334. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.06.080>
- Ayman M.T., Chung W.J., Lee H., Yoon D.-H. Fabrication and Photoluminescence of γ -AlON:Sm and Yb // J. Eur. Ceram. Soc. 2022. V. 42. № 4. P. 1348–1353. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.12.015>
- Akhmadullina N.S., Lysenkov A.S., Ashmarin A.A., Baranchikov A.E., Ishchenko A.V., Yagodin V.V., Shul'gin B.V., Kargin Y.F. Synthesis and Luminescence Properties of Eu²⁺- and Ce³⁺-doped AlONs // Ceram. Int. 2016. V. 42. № 1. Part A. P. 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.08.107>
- Dong Q., Yang F., Cui J., Tian Y., Liu S., Du F., Peng J., Ye X. Enhanced Narrow Green Emission and Thermal Stability in γ -AlON: Mn²⁺, Mg²⁺ Phosphor Via Charge Compensation // Ceram. Int. 2019. V. 45. № 9. P. 11868–11875. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.03.069>
- Jian X., Wang H., Lee M.-H.H., Tian W., Chen G.-Z.Z., Chen W.-Q.Q., Ji W.-W.W., Xu X., Yin L.-J.J. Insight the Luminescence Properties of AlON: Eu, Mg Phosphor under VUV Excitation // Materials (Basel). 2017. V. 10. № 7. P. 723. <https://doi.org/10.3390/ma10070723>
- Ахмадуллина Н.С., Шишилов О.Н., Каргин Ю.Ф. Эффекты сенсibilизации в нитридных материалах, легированных ионами редкоземельных металлов // Изв. АН Сер. хим. 2020. Т. 69. № 5. С. 825–837. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2841-4>
- Ахмадуллина Н.С., Ищенко А.В., Ягодин В.В., Лысенков А.С., Сиротинкин В.П., Каргин Ю.Ф., Шульгин Б.В. Синтез и люминесцентные свойства оксинитрида алюминия, легированного Tb³⁺ // Неорган. материалы. 2019. Т. 55. № 12. С. 1298–1304. <https://doi.org/10.1134/S0002337X19120017>
- Chen C.F., Yang P., King G., Tegmeier E.L. Processing of Transparent Polycrystalline AlON:Ce³⁺ Scintillators // J. Am. Ceram. Soc. 2016. V. 99. № 2. P. 424–430. <https://doi.org/10.1111/jace.13986>
- Zhang L., Luo H., Zhou L., Liu Q., Li J., Zhang W. Preparation of γ -Aluminum Oxynitride Phosphor with Eu Doping by Direct Nitridation in Ammonia and Postannealing // J. Am. Ceram. Soc. 2018. V. 101. № 8. P. 3299–3308. <https://doi.org/10.1111/jace.15494>
- Liu L., Zhang J., Wang X., Hou W., Liu X., Xu M., Yang J., Liang B. Preparation and Fluorescence Properties of a Cr³⁺:/ γ -AlON Powder by High Temperature Solid State Reaction // Mater. Lett. 2020. V. 258. P. 126811. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126811>
- Chen L., Du F., Liang Y., Zhu Y., Xiao Y., Peng J. A Study on Photoluminescence and Energy Transfer of γ -AlON:Ce³⁺, Eu²⁺ Phosphors for Application in Full-visible-spectrum LED Lighting // Displays. 2022. V. 71. P. 102147. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2021.102147>
- Akhmadullina N.S., Ishchenko A. V., Lysenkov A.S., Shishilov O.N., Kargin Y.F. Synthesis and Luminescence Properties of Eu²⁺/Ce³⁺, Ce³⁺/Tb³⁺ and Eu²⁺/Tb³⁺ co-doped AlONs // J. Alloys Compd. 2021. V. 887. P. 161410. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161410>
- Zhang J., Ma C., Wen Z., Du M., Long J., Ma R., Yuan X., Li J., Cao Y. Photoluminescence and Energy Transfer Properties of Eu²⁺ and Tb³⁺ Co-doped Gamma Aluminum Oxynitride Powders // Opt. Mater. 2016. V. 58. P. 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.05.048>
- Tsabit A.M., Yoon D.-H. Transparent Polycrystalline γ -AlON Fabricated Using a Hybrid Sintering Process // Scr. Mater. 2021. V. 194. P. 113715. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.113715>
- Tsabit A.M., Yoon D.-H. Review on Transparent Polycrystalline Ceramics // J. Korean Ceram. Soc. 2022. V. 59. № 1. P. 1–24. <https://doi.org/10.1007/s43207-021-00140-6>
- Каргин Ю.Ф., Ахмадуллина Н.С., Лысенков А.С., Сиротинкин В.П., Шамрай В.Ф. Синтез и рентгеноструктурное исследование твердых растворов γ -оксинитрида алюминия // Журн. неорган. химии. 2020. Т. 65. № 9. С. 1192–1197. <https://doi.org/10.31857/S0044457X20090056>
- Ахмадуллина Н.С., Лысенков А.С., Ашмарин А.А., Каргин Ю.Ф., Ищенко А.В., Ягодин В.В., Шульгин Б.В. Влияние концентрации легирующей примеси на фазовый состав и люминесцентные свойства AlON, легированных Eu²⁺ и Ce³⁺ // Неорган. материалы. 2015. Т. 51. № 5. С. 529–537. <https://doi.org/10.7868/S0002337X15050012>
- Ishchenko A.V., Akhmadullina N.S., Leonidov I.I., Sirovinkin V.P., Skvortsova L.G., Shishilov O.N., Zhidkov I.S., Kukharensko A.I., Kargin Y.F. Synthesis and Spectroscopic Properties of Aluminum Oxynitride Doped with 3d-metal Ions: The Case of γ -AlON:Ti // J. Alloys Compd. 2023. V. 934. P. 167792. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167792>

19. *Ishchenko A. V., Akhmadullina N.S., Leonidov I.I., Sirovinkin V.P., Skvortsova L.G., Mandrygina D.A., Shishilov O.N., Zhidkov I.S., Kukharensko A.I., Weinstein I.A., Kargin Y.F.* Synthesis and Spectroscopic Properties of Aluminum Oxynitride Doped with 3d-metal Ions: the Case of γ -AlON:Co [Electronic resource] // Res. Square. 2023. P. 26.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3221329/v1>
20. *Solomonov V.I., Michailov S.G., Lipchak A.I., Osipov V. V., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I., Ulmaskulov M.R.* CLAVI Pulsed Cathodoluminescence Spectroscopy // Laser Phys. 2006. V. 16. № 1. P. 126–129.
<https://doi.org/10.1134/S1054660X06010117>
21. *Хлудков С.С., Прудаев И.А., Корень Л.О., Толбанов О.П., Ивонин И.В.* Нитрид алюминия, легированный атомами группы переходных металлов, как материал для спинтроники // Изв. вузов. Физика. 2020. Т. 63. № 11. С. 162–172.
<https://doi.org/10.17223/00213411/63/11/162>
22. *Doebelin N., Kleeberg R.* Profex : A Graphical User Interface for the Rietveld Refinement Program BGMN // J. Appl. Crystallogr. 2015. V. 48. № 5. P. 1573–1580.
<https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>
23. *Каргин Ю.Ф., Ахмадулина Н.С., Лысенков А.С., Сиротинкин В.П., Шамрай В.Ф.* Синтез и рентгеноструктурное исследование твердых растворов γ -оксонитрида алюминия // Журн. неорганич. химии. 2020. Т. 65. № 9. С. 1192–1197.
<https://doi.org/10.31857/S0044457X20090056>
24. *Guo J.J., Wang K., Fujita T., McCauley J.W., Singh J.P., Chen M.W.* Nanoindentation Characterization of Deformation and Failure of Aluminum Oxynitride // Acta Mater. 2011. V. 59. № 4. P. 1671–1679.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.11.034>
25. *Kudiyakova V.S., Leonidov I.I., Chaikin D. V., Shishkin R.A., Zamyatin D.A., Weinstein I.A.* Microstructure and Luminescence Properties of the High Pressure High Temperature Sintered AlN–TiN Ceramics // Ceram. Int. 2021. V. 47. № 12. P. 16876–16881.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.263>
26. *Zheng K., Wang H., Xu P., Gu H., Tu B., Wang W., Liu S., Fu Z.* Effect of Nitrogen Content on Optical Properties of Transparent γ -AlON Polycrystalline Ceramics // J. Eur. Ceram. Soc. 2021. V. 41. № 7. P. 4319–4326.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.02.047>
27. *Kubelka P., Munk F.* Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche // Z. Tech. Phys. 1931. V. 12. P. 593–601
28. *Du X., Yao S., Jin X., Chen H., Li W., Liang B.* Radiation Damage and Luminescence Properties of Gamma Aluminum Oxynitride Transparent Ceramic // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2015. V. 48. № 34. P. 345104.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/34/345104>
29. *Tauc J.* Optical Properties and Electronic Structure of Amorphous Ge and Si // Mater. Res. Bull. 1968. V. 3. № 1. P. 37–46.
[https://doi.org/10.1016/0025-5408\(68\)90023-8](https://doi.org/10.1016/0025-5408(68)90023-8)
30. *Zhang X., Gao S., Li Z., Zhao H., Zeng Q.* First-principles Study of the Electronic Structure and Optical Properties of Eu²⁺–M (M = Mn²⁺, Mg²⁺, Li⁺) co-Doped γ -AlON Phosphor // Ceram. Int. 2019. V. 45. № 6. P. 7778–7784.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.082>