

Письменный отзыв официального рецензента на диссертационную работу
Күспанова Жәнісбека Боранбайұлы, выполненной в форме серии статей на тему
«Разработка и исследование Al-допированного фотокатализатора на основе SrTiO_3 с двойными сокатализаторами
для эффективной очистки воды и получения водорода», представленной на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе 8D07103 – «Материаловедение и инженерия»

№ п/п	Критерии	Соответствие критериям (подчеркнуть один из вариантов ответа)	Обоснование позиции официального рецензента (замечания выделить курсивом)
1.	Тема диссертации (на дату ее развития) утверждения) соответствует направлениям развития науки и/или государственным программам	1.1 Соответствие приоритетным направлениям развития науки или государственным программам: 1) <u>Диссертация</u> <u>выполнена</u> <u>в рамках проекта</u> <u>или</u> <u>целевой программы</u> , <u>финансируемого(ой)</u> <u>из государственного бюджета</u> (указать название и номер проекта или программы); 2) <u>диссертация</u> <u>выполнена</u> <u>в рамках другой государственной программы</u> (указать название программы); 3) <u>Диссертация</u> <u>соответствует приоритетному направлению развития науки, утвержденному Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан</u> (указать направление).	Диссертационная работа соответствует приоритетному направлению развития науки: «Энергия, передовые материалы и транспорт». Исследования, проведенные в настоящей диссертации, были выполнены в рамках следующих научных программ и проектов: - Конкурс грантового финансирования Комитета науки МОН РК на 2022–2024 годы ИРН AP14869381 на тему «Разработка композиционного фотокатализатора $\text{SrTiO}_3/\text{Al}/\text{Оксид графена}$ для эффективного получения водорода путем разложения воды»;
2.	Важность для науки	Работа <u>вносит</u> /не вносит существенный вклад в науку, а ее важность <u>хорошо</u> раскрыта/не раскрыта.	Результаты, полученные в ходе диссертационной работы, вносят существенный вклад в развитие фундаментальных и прикладных аспектов фотокатализа и материаловедения. Работа направлена на решение актуальной научной задачи повышения эффективности процессов фотокаталитического водоразложения и очистки воды за счет разработки и оптимизации алюминием-допированных перовскитных материалов SrTiO_3 с двойными

		сокатализаторами. Автором предложен комплексный подход, включающий модификацию структуры, регулирование ширины запрещенной зоны и пространственное разделение зарядов посредством селективного фотоосаждения сокатализаторов Rh/Cr ₂ O ₃ и CoOOH. Представленные результаты демонстрируют новые возможности управления фотогенерацией и переносом зарядов, что имеет важное значение для создания эффективных систем солнечного водородного производства и экологически чистых технологий водоочистки. Таким образом, научная значимость работы заключается в развитии представлений о взаимосвязи состава, структуры и фотокаталитических свойств перовскитных материалов и в обосновании перспектив их практического применения.	
3.	Принцип самостоятельности	Уровень самостоятельности: 1) высокий ; 2) средний; 3) низкий; 4) самостоятельности нет.	Автор диссертационной работы проявил высокий уровень самостоятельности на всех этапах исследования — от анализа литературы и постановки задач до проведения экспериментов и интерпретации результатов. Докторант самостоятельно выполнил синтез и модификацию фотокатализаторов SrTiO ₃ :Al, фотоосаждение двойных сокатализаторов Rh/Cr ₂ O ₃ и CoOOH, а также анализ структурных и оптических свойств с применением современных методов. Самостоятельность подтверждается публикацией результатов в высокорейтинговых журналах, что отражает личный вклад автора и его способность решать научные задачи без внешнего руководства.
4.	Принцип внутреннего единства	4.1 Обоснование актуальности диссертации: 1) обоснована ; 2) частично обоснована; 3) не обоснована.	Диссертационная работа отличается внутренней логической завершенностью и концептуальным единством. Все разделы исследования — от анализа современного состояния фотокатализа до синтеза, структурно-фазового анализа и фотокаталитических испытаний — взаимосвязаны и направлены на решение единой научной задачи повышения эффективности фотокаталитических процессов на основе модифицированных перовскитных систем SrTiO₃:Al. Предложенный автором подход, включающий легирование алюминием и селективное фотоосаждение двойных сокатализаторов Rh/Cr ₂ O ₃ и CoOOH, последовательно обоснован теоретически и подтвержден экспериментально. Полученные результаты взаимно дополняют друг друга, демонстрируя четкую

	связь между составом, структурой и фотокаталитическими свойствами материалов. Таким образом, работа представляет собой целостное, системно выстроенное исследование, отличающееся внутренней логикой, согласованностью этапов и направленностью на достижение поставленной цели.
4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации: 1) <u>отражает</u> ; 2) частично отражает; 3) не отражает.	Диссертационная работа, выполненная в форме серии научных статей, отличается внутренним единством, последовательностью и логической взаимосвязью представленных результатов. Все публикации направлены на решение общей научной задачи — повышение эффективности фотокаталитических процессов на основе алюминием-допированных перовскитных материалов SrTiO_3 . Каждая статья раскрывает отдельный этап комплексного исследования: синтез и структурно-фазовый анализ материалов, влияние алюминиевого легирования на оптические и электронные свойства, а также эффект двойных сокатализаторов $\text{Rh}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ и CoOOH на фотокаталитическую активность при водоочистке и водоразложении воды. Несмотря на самостоятельность публикаций, они объединены общей концепцией, методологией и целевой направленностью, что обеспечивает целостность и завершенность диссертационного исследования в целом.
4.3. Цель и задачи соответствуют теме диссертации: 1) <u>соответствуют</u> ; 2) частично соответствуют; 3) не соответствуют.	Поставленные в диссертационной работе цели и задачи полностью соответствуют ее теме и решены в полном объеме. Внутреннее единство исследования обеспечено комплексным подходом, включающим разработку, синтез, структурно-фазовый и фотоэлектронный анализ алюминием-допированных фотокатализаторов SrTiO_3 , а также изучение влияния двойных сокатализаторов $\text{Rh}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ и CoOOH на их фотокаталитическую активность. Задачи исследований: 1. Синтезировать SrTiO_3 высокой чистоты и кристалличности методом химического осаждения, провести термическую обработку и оптимизировать условия синтеза. 2. Исследовать легирование алюминием синтезированного SrTiO_3 методом расплавленного флюса, а также изучить его физико-химические свойства и электронные характеристики с использованием метода DFT.

	3. Провести осаждение двойных сокатализаторов на основе $\text{Rh/Cr}_2\text{O}_3$ и CoOOH на поверхность $\text{SrTiO}_3@Al$ методом фотоосаждения с последующим изучением их морфологии, структуры и оптических свойств. 4. Оценить влияние степени модификации и параметров синтеза на фотокаталитическую активность образцов при деградации органического красителя под видимым светом и при фотокаталитическом расщеплении воды с выделением водорода. 5. Провести масштабные полевые эксперименты по производству водорода с использованием, разработанного панельного фотокаталитического реактора с эффективной площадью светопоглощения 1 м^2.
4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны: 1) <u>ПОЛНОСТЬЮ ВЗАИМОСВЯЗАНЫ</u>; 2) взаимосвязь частичная; 3) взаимосвязь отсутствует.	Разделы диссертационной работы и представленные научные положения логически взаимосвязаны и обладают внутренним единством. Во всех публикациях прослеживается единая линия экспериментальных исследований, направленных на повышение эффективности фотокаталитических процессов с использованием алюминием-допированных перовскитных материалов SrTiO_3. Последовательность изложения и взаимосвязь полученных результатов подтверждают целостность концепции, охватывающей этапы синтеза, структурно-фазового анализа и изучения влияния двойных сокатализаторов $\text{Rh/Cr}_2\text{O}_3$ и CoOOH на фотокаталитическую активность.
4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными материалами: 1) <u>критический анализ есть</u>; 2) анализ частичный; 3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов; 4) анализ отсутствует.	Автором проведен всесторонний анализ современных подходов к повышению эффективности фотокаталитических систем на основе перовскитных данных предложены новые решения, включающие алюминиевое легирование структуры SrTiO_3 и использование двойных сокатализаторов $\text{Rh/Cr}_2\text{O}_3$ и CoOOH, обеспечивающих эффективное пространственное разделение зарядов и снижение рекомбинации носителей. Предложенные методы синтеза и фотоосаждения аргументированы сопоставлением с известными технологиями модификации фотокатализаторов, что позволило обосновать их преимущества в плане повышения активности, стабильности и энергетической эффективности процессов водоочистки и фотокаталитического водоразложения.

		Таким образом, диссертационная работа демонстрирует научную обоснованность и новизну предложенных решений, подтверждённую экспериментальными результатами и сравнительным анализом с литературными данными.
5. Принцип научной новизны	5.1 Научные результаты и положения являются новыми? 1) <u>полностью новые</u>; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Научные результаты и положения диссертационной работы обладают высокой степенью новизны. Автором впервые разработан комплексный подход к повышению фотокаталитической активности Al-допированного SrTiO_3 за счет управляемого легирования структуры и селективного фотоосаждения двойных сокатализаторов $\text{Rh}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ и CoOOH. Такой подход обеспечивает эффективное пространственное разделение фотогенерированных зарядов и снижение их рекомбинации, что ведет к росту фотокаталитической активности в реакциях водоочистки и фотокаталитического водоразложения. Новизна подтверждается экспериментальными результатами, демонстрирующими влияние алюминиевого легирования на образование кислородных вакансий и оптимизацию электронной структуры SrTiO_3, а также синергетическим эффектом двойных сокатализаторов. Полученные данные согласуются с современными теоретическими представлениями, но при этом расширяют их, внося вклад в развитие научных основ проектирования эффективных перовскитных фотокатализаторов. Предложенные решения отличаются оригинальностью и практической значимостью, что подтверждается публикацией результатов в высокорейтинговых международных журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.
	5.2 Выводы диссертации являются новыми? 1) <u>полностью новые</u>; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Выводы, представленные в диссертационной работе, являются новыми и отражают значимый вклад автора в развитие научного направления фотокатализа. 1. Установлено, что при синтезе SrTiO_3 методом химического осаждения последующая температура кальцинации влияет на размеры, чистоту и кристалличность частиц SrTiO_3, при этом температура кальцинации 1100°C позволяет получать частицы SrTiO_3 с высокой кристалличностью и чистотой; 2. Показано, что использование метода расплавленного флюса позволяет

		вводить Al в SrTiO_3 без изменения кристаллической структуры матрицы. Установлено, что легирование Al способствует подавлению рекомбинационных центров Ti^{3+} и формированию кислородных вакансий, повышающих фотокаталитическую эффективность; 3. Обнаружено, что нанесение двойных сокатализаторов ($\text{Rh}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ и CoOOH) на поверхность $\text{SrTiO}_3@\text{Al}$, методом фотоосаждения ускоряет разделение фотогенерированных зарядов и снижает рекомбинацию фотогенерированных электроно-дырочных пар. Кроме того, синтезированный композит показал улучшенную фотокаталитическую активность в деградации MB под видимым светом (89% за 60 минут), что превышает активность $\text{SrTiO}_3@\text{Al}$ и SrTiO_3 в 4,9 и 6,6 раза соответственно; 4. Доказано, что концепция панельного реактора для разложения воды является эффективным методом для масштабного производства недорогого возобновляемого солнечного водорода. Композит $\text{Rh}/\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{SrTiO}_3@\text{Al}/\text{CoOOH}$ способен производить 106 мл водорода в час в реальных условиях с использованием фотокаталитического реактора площадью 1 м².
5.3	Технические, технологические, экономические или управленческие решения являются новыми и обоснованными:	Предложенные в диссертационной работе технические и технологические решения являются новыми, обоснованными и научно подтвержденными. Автором разработана оптимизированная методология синтеза Al-допированного SrTiO_3 с использованием метода расплавленного флюса, обеспечивающего равномерное внедрение алюминия в кристаллическую решетку без нарушения ее структуры. Это решение способствует улучшению кристалличности, снижению концентрации дефектов Ti^{3+} и повышению эффективности переноса заряда. Технологически обосновано применение селективного фотоосаждения двойных сокатализаторов $\text{Rh}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ и CoOOH, что обеспечивает пространственное разделение фотогенерированных зарядов и устойчивое протекание процессов водоочистки и водоразложения под действием солнечного света. Предложенные решения не только демонстрируют высокую

		фотокаталитическую активность и стабильность материалов, но и обладают экономическими преимуществами за счет использования доступных компонентов и возможности масштабирования технологии в промышленных фотохимических системах. Это подтверждает практическую целесообразность и инновационный характер предложенных технических и технологических подходов.
6.	Обоснованность основных выводов	Все основные выводы <u>основаны</u>/не основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research (кваликатив ресеч) и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам). Основные выводы, представленные в диссертационной работе, основаны на достоверных и научно обоснованных данных, полученных в результате комплексных экспериментальных исследований. Все положения логично вытекают из представленных результатов и подтверждаются совокупностью физико-химических методов анализа — рентгенофазовым анализом (XRD), электронной микроскопией (SEM, TEM), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (XPS) и диффузно-отражательной спектроскопией (UV-Vis DRS). Выводы не противоречат известным теоретическим положениям и современным тенденциям в области фотокатализа и материаловедения. Они основаны на сопоставлении экспериментальных данных с литературными источниками и демонстрируют внутреннюю согласованность и достоверность полученных результатов. Таким образом, все основные выводы диссертации являются научно аргументированными, обоснованными и подтверждёнными экспериментальными доказательствами.
7.	Основные положения, выносимые защиту	Необходимо ответить на следующие вопросы по каждому положению в отдельности: на 7.1 Доказано ли положение? 1) доказано; 2) скорее доказано; 3) скорее не доказано; 4) не доказано; 5) в текущей формулировке проверить Положение 1: Повышение температуры кальцинации от 800 до 1100 °C при синтезе SrTiO_3 методом химического осаждения способствует увеличению размеров и кристалличности частиц, а также улучшению чистоты за счет полного разложения промежуточного продукта SrCO_3. Последующее легирование Al подавляет нежелательные рекомбинационные центры Ti^{3+} и способствует увеличению концентрации кислородных вакансий. 1) доказано; 2) не является тривиальным; 3) является новым;

	доказанность положения невозможно. 7.2 Является ли тривиальным? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить тривиальность положения невозможно. 7.3 Является ли новым? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить новизну положения невозможно. 7.4 Уровень для применения: 1) узкий; 2) средний; 3) широкий; 4) в текущей формулировке проверить уровень применения положения невозможно. 7.5 Доказано ли в статье? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить доказанность положения в статье невозможно.	4) уровень применения — средний (для широкого класса перовскитных фотокатализаторов); 5) доказано в статье. Положение 2: Нанесение двойных сокаталлизаторов (Rh/Cr₂O₃ и CoOOH) на поверхность SrTiO₃@Al методом фотоосаждения существенно повышает фотокаталитическую активность благодаря эффективному разделению фотогенерированных зарядов; синтезированный композит показал 89% деградации органического загрязнителя под видимым светом за 60 минут ($k = 0,0312 \text{ мин}^{-1}$). 1) доказано; 2) не является тривиальным; 3) является новым; 4) уровень применения — широкий (в области фотокаталитической очистки воды и органических загрязнителей); 5) доказано в статье. Положение 3: Модифицированный композит Rh/Cr₂O₃/SrTiO₃@Al/CoOOH демонстрирует значительно улучшенные показатели фотокаталитического выделения водорода — $11,04 \text{ ммоль} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$, что в 2300 и 3067 раз выше по сравнению с SrTiO₃@Al и чистым SrTiO₃ соответственно. В панельном реакторе площадью 1 м^2 композит способен производить 106 мл водорода в час под солнечным освещением. 1) доказано; 2) не является тривиальным; 3) является новым; 4) уровень применения — широкий (для масштабируемых солнечных систем получения водорода); 5) доказано в статье.
8. Принцип достоверности. Достоверность	8.1 Выбор методологии - обоснован или методология достаточно подробно описана: 1) <u>да</u>;	Методология исследования выбрана и обоснована с учётом закономерностей формирования структуры и функциональных свойств фотокатализаторов на основе перовскитных материалов. Автор использовал комплекс современных

источников предоставляемой информации	и 2) нет.	экспериментальных и аналитических методов, включающих химическое осаждение, метод расплавленного флюса, а также селективное фотоосаждение двойных сокатализаторов Rh/Cr ₂ O ₃ и CoOOH.
8.2 Результаты диссертационной работы	получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с методик: XRD, SEM, TEM, XPS и UV-Vis DRS. применением компьютерных технологий: 1) <u>да</u> ; 2) нет.	Результаты диссертационной работы получены с применением современного научного оборудования и высокоточных методов исследования структуры и свойств фотокатализаторов. В работе использованы передовые аналитические методики: XRD, SEM, TEM, XPS и UV-Vis DRS. Для обработки и интерпретации экспериментальных данных применялись современные программные средства и вычислительные технологии, включая использование методов квантово-механического моделирования (DFT) в пакете Quantum ESPRESSO для анализа электронной структуры и энергетических характеристик фотокатализаторов. Применение таких подходов обеспечивает высокую достоверность, воспроизводимость и научную обоснованность полученных результатов, что полностью соответствует современным требованиям к экспериментальным исследованиям в области материаловедения и фотокатализа.
8.3 Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности	доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием (для направлений подготовки по педагогическим наукам результаты показаны на основе педагогического эксперимента): 1) <u>да</u> ; 2) нет.	Теоретические выводы, выявленные закономерности и установленные взаимосвязи в диссертационной работе доказаны и подтверждены результатами комплексных экспериментальных исследований. Автором проведено сопоставление теоретических предположений, основанных на расчетах метода DFT, с данными, полученными экспериментально при изучении структурных, электронных и фотокаталитических характеристик Al-допированного SrTiO ₃ и композитов с двойными сокатализаторами Rh/Cr ₂ O ₃ и CoOOH. Совпадение теоретических и экспериментальных результатов подтверждает корректность предложенной модели влияния алюминиевого легирования и двойных сокатализаторов на процессы переноса зарядов и повышение фотокаталитической активности. Таким образом, представленные выводы и установленные закономерности имеют прочное экспериментальное обоснование, что свидетельствует о высокой достоверности полученных научных результатов.

	8.4 Важные утверждения <u>подтверждены/частично подтверждены/не подтверждены</u> ссылками на авторитетные источники современной научной литературы. Достоверную научную литературу.	Важные теоретические и экспериментальные утверждения, представленные в диссертационной работе, подтверждены многочисленными ссылками на авторитетные и достоверные источники современной научной литературы. Автор опирается на публикации в ведущих международных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, что свидетельствует о глубоком знании современного состояния исследований в области фотокатализа, материаловедения и нанотехнологий. Цитируемые источники охватывают последние достижения в области синтеза и модификации перовскитных фотокатализаторов, влияния легирования и сокатализаторов на процессы переноса зарядов и повышения эффективности водоразложения. Такой подход обеспечивает высокий уровень достоверности представленной информации и подтверждает научную обоснованность полученных результатов и выводов.
	8.5 Использованные источники литературы <u>достаточно/не достаточно</u> для литературного обзора.	В диссертационной работе, выполненной в форме серии научных статей, использованы актуальные и достоверные литературные источники, обеспечивающие всестороннее освещение современного состояния исследований в области фотокатализа, материаловедения и нанотехнологий. В каждой статье приведён аналитический обзор, отражающий эволюцию научных представлений и тенденции развития в части легирования SrTiO_3, применения двойных сокатализаторов и повышения эффективности фотокалалитических процессов. Использованные источники литературы охватывают широкий круг современных исследований, что обеспечивает теоретическую обоснованность, научную достоверность и логическую целостность всей диссертационной работы.
9 Принцип практической ценности	9.1 Диссертация имеет теоретическое значение: 1) <u>да</u>; 2) нет.	Диссертационная работа, выполненная в форме серии статей, имеет значительное теоретическое значение, так как углубляет научные представления о механизмах легирования и переносе зарядов в перовскитных фотокатализаторах $\text{SrTiO}_3:\text{Al}$ с двойными сокатализаторами.
	9.2 Диссертация имеет практическое значение и существует высокая вероятность применения	Диссертационная работа имеет высокое практическое значение, поскольку полученные результаты могут быть использованы при разработке

	полученных результатов на практике: 1) <u>да</u>; 2) нет.	эффективных фотокаталитических систем для очистки воды от органических загрязнителей и получения водорода под действием солнечного излучения, что открывает перспективы их применения в экологических и энергетических технологиях.
	9.3 Предложения для практики являются новыми: 1) <u>полностью новые</u>; 2) частично новые (новыми являются 25-75%); 3) не новые (новыми являются менее 25%).	Предложения для практики, представленные в диссертационной работе, являются новыми и обладают высокой практической ценностью, поскольку впервые обоснована возможность применения Al-допированного SrTiO_3 с двойными сокатализаторами $\text{Rh}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ и CoOOH в качестве эффективного фотокатализатора для водоочистки и солнечного водоразложения воды.
10.	Качество написания и оформления Качество академического письма: 1) <u>высокое</u>; 2) среднее; 3) ниже среднего; 4) низкое.	Качество академического письма в диссертационной работе, выполненной в форме серии статей, находится на высоком уровне: все публикации написаны ясно, логично и последовательно, в соответствии с международными академическими стандартами, что обеспечивает научную ценность и лёгкое восприятие представленных результатов и выводов.
11.	Замечания диссертации к Несмотря на высокий научный уровень представленных публикаций, рецензент отмечает несколько незначительных замечаний. В аннотации следовало бы более четко выделить взаимосвязь между отдельными статьями, подчеркнув их вклад в формирование общей научной концепции диссертации. В презентации же можно было бы уделить больше внимания визуализации сравнительных результатов по всем публикациям для наглядного отражения эволюции исследования. Незначительное количество опечаток не снижает качество диссертационной работы.	
12.	Научный уровень статей доктора, представленных в составе диссертации, выполненной в форме серии публикаций, статей доктора полностью соответствует требованиям, предъявляемым к работам данного уровня. Все статьи опубликованы в рецензируемых по теме научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, а также в изданиях, посвященных защите диссертации в научные выводы исследования, что свидетельствует о высоком научном уровне, самостоятельности автора, актуальности формы серии статей тематики и новизне полученных результатов. официальные рецензенты комментируют научный уровень	

каждой статьи докторанта по теме исследования)	
13. Решение официального рецензента (согласно пункту 28 настоящего Типового положения)	Диссертационная работа Кұспанова Жәнісбека Боранбайұлы, выполненная в форме серии научных статей, соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора философии (PhD). Содержание работы отражает высокий уровень научной подготовки, самостоятельность автора, новизну и практическую значимость полученных результатов. Считаю, что Кұспанов Жәнісбек Боранбайұлы заслуживает присуждения ученой степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07103 – «Материаловедение и инженерия».

Официальный рецензент

кандидат химических наук, асс. профессор, и.о. директора научно-исследовательского института новых химических технологий и материалов,
 НАО Казахский национальный университет им. аль-Фараби



Шакиева Т. В.