

Письменный отзыв официального рецензента на диссертационную работу Толубаева Каната Сайлаужановича на тему:

«Исследование и разработка перспективного метода синтеза кремния для литий-ионных аккумуляторов», представленную на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 8D07101 – «Нанотехнологии в инженерии»

№ п/п	Критерии	Соответствие критериям (подчеркнуть один из вариантов ответа)	Обоснование позиции официального рецензента (замечания выделить курсивом)
1.	Тема диссертации (на дату утверждения) соответствует направлениям развития науки и/или государственным программам	1.1 Соответствие приоритетным направлениям развития науки и/или государственным программам: 1) диссертация выполнена в рамках проекта или целевой программы, финансируемого(ой) из государственного бюджета (указать название и номер проекта или программы); 2) диссертация выполнена в рамках другой государственной программы (указать название программы); 3) диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки, утвержденному Высшей научно-технической комиссией при Правительстве Республики Казахстан (указать направление).	Диссертационное исследование Толубаева К.С. «Исследование и разработка перспективного метода синтеза кремния для литий-ионных аккумуляторов» органично вписывается в приоритетные направления государственной научной политики Республики Казахстан. В Концепции развития высшего образования науки на 2023–2029 годы (Постановление Правительства РК от 28 марта 2023 года № 248) подчеркивается важность создания передовых материалов и технологий в сфере накопления и хранения энергии, что напрямую соотносится с тематикой данной работы. Также диссертация соответствует целям Государственной программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2020–2025 годы (Постановление Правительства РК от 31 декабря 2019 года № 1050), где одной из стратегических задач определено развитие высокотехнологичных производств, включая компоненты для электроники и энергосберегающих систем. Результаты исследования обладают потенциалом для практической реализации и могут способствовать повышению конкурентоспособности отечественной промышленности и снижению её зависимости от внешних технологий.

2.	Важность для науки	Работа вносит/не вносит существенный вклад в науку, а ее важность хорошо раскрыта/не раскрыта.		<p>Работа вносит существенный вклад в развитие науки в области нанотехнологий и материаловедения, так как направлена на создание нового подхода к синтезу кремния для литий-ионных аккумуляторов. Важность исследования обоснована как с точки зрения фундаментальной науки, так и практического применения в энергетике и промышленности, и представлена в диссертации достаточно полно.</p>
3.	Принцип самостоятельности	<p>Уровень самостоятельности: 1) высокий; 2) средний; 3) низкий; 4) самостоятельности нет.</p>		<p>Уровень самостоятельности высокий. Личное участие доктранта проявилось в самостоятельном планировании и проведении экспериментов, выполнении теоретических и экспериментальных исследований, а также в анализе, обсуждении и обобщении полученных результатов.</p>
4.	Принцип единства внутреннего	<p>4.1 Обоснование актуальности диссертации: 1) обоснована; 2) частично обоснована; 3) не обоснована.</p> <p>4.2 Содержание диссертации отражает тему диссертации: 1) отражает; 2) частично отражает; 3) не отражает.</p>	<p>Структура и содержание диссертационной работы полностью соответствуют теме исследования. Работа системно раскрывает актуальные направления создания кремниевых наноструктур для литий-ионных аккумуляторов: начиная с анализа существующих методов идентификации тонких плёнок, разработки методики магнетронного напыления, изучения полиморфизма и особенностей волоконистого nano-Si, до построения математических моделей кинетики роста и оптимизации технологических параметров для</p>	<p>Диссертационная работа посвящена актуальной научно-практической задаче - разработке метода синтеза кремния для применения в литий-ионных аккумуляторах. Актуальность темы определяется возрастающей потребностью в создании энергоёмких и долговечных источников питания, а также развитием технологий хранения энергии в условиях перехода к «зелёной» энергетике.</p>

		<p>максимизации концентрации нанокристаллитов. Комплексное выполнение поставленных задач обеспечивает достижение заявленной цели исследования и демонстрирует самостоятельность и высокий научный уровень работы.</p>
	<p>4.3. Цель и задачи соответствуют теме диссертации: 1) соответствуют; 2) частично соответствуют; 3) не соответствуют.</p>	<p>Цель и задачи исследования полностью соответствуют заявленной теме. Сформулированная цель отражает актуальные направления разработки кремниевых наноструктур для литий-ионных аккумуляторов, а поставленные задачи охватывают анализ существующих проблем, разработку методологии, исследование полиморфизма, моделирование процессов роста и оптимизацию технологических параметров. Их выполнение обеспечивает достижение поставленной цели.</p>
	<p>4.4 Все разделы и положения диссертации логически взаимосвязаны: 1) полностью взаимосвязаны; 2) взаимосвязь частичная; 3) взаимосвязь отсутствует.</p>	<p>Все разделы и положения диссертации полностью взаимосвязаны. Теоретическая часть органично переходит в описание методики исследований, затем - в экспериментальные результаты, анализ полиморфизма и особенностей волокнистого nano-Si, а далее - в построение математических моделей и практические рекомендации. Такая последовательность обеспечивает логичность изложения и наглядно демонстрирует выполнение поставленных целей и задач работы.</p>
	<p>4.5 Предложенные автором новые решения (принципы, методы) аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями: 1) критический анализ есть; 2) анализ частичный;</p>	<p>Предложенные автором новые решения (методы синтеза кремния, математические модели кинетики роста и рекомендации по магнетронному напылению) аргументированы и оценены на фоне существующих подходов. В диссертации проведён критический анализ литературы, выявлены недостатки предыдущих методов, обоснована необходимость разработки новых плёночных</p>

	<p>3) анализ представляет собой не собственные мнения, а цитаты других авторов;</p> <p>4) анализ отсутствует.</p>	<p>структур и оптимизации технологических параметров, что позволяет заключить, что критический анализ присутствует.</p>
	<p>5.1 Научные результаты и положения являются новыми?</p> <p>1) полностью новые;</p> <p>2) частично новые (новыми являются 25-75%);</p> <p>3) не новые (новыми являются менее 25%).</p>	<p>Научные результаты и положения диссертационной работы являются новыми, причём значительная их часть представляет собой оригинальные научные достижения докторанта. Среди них выделяются: выявление ранее неизвестной формы волокнистых кремниевых нанокристаллитов, особенности спектрограммы Рамана для новых наноструктур, разработка математических моделей кинетики роста кремниевых плёнок и практические рекомендации по оптимизации магнетронного напыления.</p>
<p>5. Принцип научной новизны</p>	<p>5.2 Выводы диссертации являются новыми?</p> <p>1) полностью новые;</p> <p>2) частично новые (новыми являются 25-75%);</p> <p>3) не новые (новыми являются менее 25%).</p>	<p>Выводы диссертационной работы полностью новые, так как отражают значимые оригинальные результаты исследования докторанта. Среди них - обнаружение ранее неизвестного волокнистого нано-Si, установление особенностей его спектрограммы Рамана, создание математических моделей роста кремниевых плёнок и формулировка практических рекомендаций по эффективной организации процесса магнетронного напыления.</p>
	<p>5.3 Технические, технологические, экономические или управленческие решения являются новыми и обоснованными:</p> <p>1) полностью новые;</p> <p>2) частично новые (новыми являются 25-75%);</p> <p>3) не новые (новыми являются менее 25%).</p>	<p>Предложенные технические и технологические решения в диссертационной работе являются частично новыми (25-75%). К новым относятся: оптимизация технологических параметров магнетронного напыления для увеличения доли волокнистых нанокристаллитов кремния, разработка математических моделей кинетики роста плёнок и практические рекомендации по повышению производительности процесса. Остальные</p>

		<p>решения базируются на известных подходах и методиках, но уточнены и адаптированы для конкретной исследуемой задачи.</p>
<p>6. Обоснованность основных выводов</p>	<p>Все основные выводы основаны/не основаны на весомых с научной точки зрения доказательствах либо достаточно хорошо обоснованы (для qualitative research (квалиitatif ресеч) и направлений подготовки по искусству и гуманитарным наукам).</p>	<p>Все основные выводы диссертационной работы основаны на весомых научных доказательствах и подтверждены результатами экспериментальных исследований, математическим моделированием, анализом спектроскопических данных и статистической обработкой экспериментов. Обоснованность выводов достаточно для признания их надежными и корректными с научной точки зрения.</p>
<p>7. Основные положения, выносимые на защиту</p>	<p>Необходимо ответить на следующие вопросы по каждому положению в отдельности: 7.1 Доказано ли положение? 1) доказано; 2) скорее доказано; 3) скорее не доказано; 4) не доказано; 5) в текущей формулировке проверить 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.</p>	<p>Положение 1: Ранее неизвестная форма волоконистых кремниевых нанокристаллитов диаметром от 10 до 150 нм в составе кремниевой плёнки, полученная методом магнетронного напыления. При этом структура плёнки пористая, ячеистая, возникающая в результате переплетения нановолокон кремния. Ячейки имеют вытянутую овальную форму шириной и длиной около 1 и 3 мкм соответственно. 7.1 Доказано; 7.2 Нет; 7.3 Да; 7.4 Широкий; 7.5 Да. Положение 2: Особенности спектрограммы Рамана, характерные для кремниевых плёнок, имеющих в своём составе нанокристаллиты нового типа. Пик аморфного кремния в районе 120 см^{-1}, кристаллического кремния в районе 210 см^{-1}. Оба пика имеют характерное расщепление. Пик nano-Si нового типа с максимумом при сдвиге 519 см^{-1}, что отгибает его от сферических</p>

	<p>7.4 Уровень для применения:</p> <p>1) узкий; 2) средний; 3) широкий; 4) в текущей формулировке проверить уровень применения положения невозможно.</p> <p>7.5 Доказано ли в статье? 1) да; 2) нет; 3) в текущей формулировке проверить доказанность положения в статье невозможно.</p>	<p>нанокристаллитов кремния, которые дают пик в районе 514-518 см⁻¹.</p> <p>7.1 Доказано; 7.2 Нет; 7.3 Да; 7.4 Широкий; 7.5 Да.</p> <p>Положение 3: Математические модели, описывающие кинетику роста толщины кремниевых плёнок, получаемых методом магнетронного напыления при различном давлении в рабочей камере.</p> <p>7.1 Доказано; 7.2 Нет; 7.3 Да; 7.4 Широкий; 7.5 Да.</p> <p>Положение 4: Зависимости основных показателей магнетронного напыления: время индукционного периода, скорость роста плёнки в стационарном режиме и унос кремния от удельной мощности при постоянном (не импульсном) напряжении на мишени и от частоты напряжения на мишени при максимально возможной удельной мощности, описанные соответствующими математическими моделями.</p> <p>7.1 Доказано; 7.2 Нет; 7.3 Да; 7.4 Широкий; 7.5 Да.</p> <p>Положение 5: Математическая модель, связывающая долю nano-Si в составе полученной кремниевой плёнки</p>
--	--	---

		<p>(У) и основные технологические параметры магнетронного напыления кремния: Удельная мощность на мишени, Вт/см² (X1), Давление в рабочей камере, Па (X2), Частота напряжения на мишени, кГц (X3):</p> $Y = -30.7846 + 62.897 \times X2 + 0.2277 \times X3 - 5.3108 \times X2^2$ <p>7.1 Доказано;</p> <p>7.2 Нет;</p> <p>7.3 Да;</p> <p>7.4 Широкий;</p> <p>7.5 Да.</p> <p>Положение 6: Практические рекомендации по магнетронному напылению кремниевых плёнок на основе анализа кинетических закономерностей роста толщины плёнок. Для максимальной интенсификации процесса без потери волокнистой структуры нанкристаллитов кремния необходимо: установить удельную мощность на мишени 60-100 Вт/см². Поддерживать частоту импульсов напряжения на мишени 100-500 Гц. При этом достигается сокращение времени индукционного периода процесса до 5-15 секунд и увеличивается скорость роста кремниевой плёнки до 12800 нм/мин в стационарном режиме. Потери кремния составляют до 7-15%.</p> <p>7.1 Доказано;</p> <p>7.2 Нет;</p> <p>7.3 Да;</p> <p>7.4 Широкий;</p> <p>7.5 Да.</p> <p>Положение 7: Параметры магнетронного напыления, на основе разработанной математической модели, при которых достигается максимальная</p>
--	--	---

		<p>концентрация нанокристаллитов кремния волоконного типа в составе плёнки. Расчётная максимальная доля нано-Si в плёнке 75,06% достигается при частоте напряжения на мишени 100 Гц и давлении в рабочей камере 1,9 Па.</p> <p>7.1 Доказано; 7.2 Нет; 7.3 Да; 7.4 Широкий; 7.5 Да.</p>
	<p>8.1 Выбор методологии - обоснован или методология достаточно подробно описана: 1) да; 2) нет.</p>	<p>Методология достаточно подробно описана. Диссертационная работа основана на современных теоретических подходах (теория твёрдого тела, наноматериалы), физико-химических и структурных методах анализа, статистической обработке данных и математическом моделировании, методология подробно описана.</p>
<p>8. Принципы достоверности. Достоверность источников и предоставляемой информации</p>	<p>8.2 Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных с применением компьютерных технологий: 1) да; 2) нет.</p>	<p>Результаты диссертационной работы получены с использованием современных методов научных исследований и методик обработки и интерпретации данных. В работе применены современные экспериментальные методы, включая рамановскую спектроскопию, СЭМ, а также моделирование кинетики роста кремниевых плёнок.</p>
	<p>8.3 Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием (для направлений подготовки по педагогическим наукам результаты</p>	<p>Теоретические выводы, модели, выявленные взаимосвязи и закономерности доказаны и подтверждены экспериментальным исследованием и согласуются с наблюдаемыми особенностями структуры и свойств волокнистого нано-Si.</p>

	<p>Доказаны на основе педагогического эксперимента):</p> <p>1) да;</p> <p>2) нет.</p> <p>8.4 Важные утверждения подтверждены/частично подтверждены/не подтверждены ссылками на актуальную и достоверную научную литературу.</p> <p>8.5 Использованные источники литературы достаточны/не достаточны для литературного обзора.</p>	<p>Основные утверждения обоснованы современными источниками, также часть положений опирается на оригинальные экспериментальные данные докторанта.</p> <p>Литературный обзор охватывает ключевые работы по идентификации тонких кремниевых плёнок, магнетронному напылению и исследованию полиморфизма, что обеспечивает теоретическую основу исследования.</p>
	<p>9.1 Диссертация имеет теоретическое значение:</p> <p>1) да;</p> <p>2) нет.</p> <p>9.2 Диссертация имеет практическое значение и способствует высокой вероятности применения полученных результатов на практике:</p> <p>1) да;</p> <p>2) нет.</p>	<p>Диссертация имеет большое теоретическое значение. Диссертация вносит вклад в развитие теории создания и анализа кремниевых наноструктур, расширяет знания о полиморфизме тонких плёнок и закономерностях их роста.</p>
<p>9</p> <p>Принцип практической ценности</p>	<p>9.3 Предложения для практики являются новыми:</p> <p>1) полностью новые;</p> <p>2) частично новые (новыми являются 25-75%);</p> <p>3) не новые (новыми являются менее 25%).</p>	<p>Предложения для практики частично новые (новыми являются 25–75%). Новыми являются рекомендации по оптимизации технологических параметров магнетронного напыления и повышению доли волоконистых нанокристаллитов в плёнках; остальные предложения уточняют известные подходы.</p>

10.	Качество написания и оформления	Качество академического письма: 1) высокое ; 2) среднее; 3) ниже среднего; 4) низкое.	Качество академического письма в диссертации высокое. Текст логично структурирован, изложение ясное и последовательное, терминология соответствует научной дисциплине, используются корректные формулировки и стиль академической речи.
11.	Замечания к диссертации	На защиту выносятся 7 положений. При этом часть из них близки по содержанию (например, 3, 4 и 5, а также практические рекомендации, выделенные отдельно), поэтому их целесообразно было бы объединить, чтобы избежать излишней дробности. Однако, данное замечание носит лишь рекомендательный характер и не снижает качество диссертационной работы.	
12.	Научный уровень статей докторанта по теме исследования (в случае защиты диссертации в форме серии статей официальные рецензенты комментируют научный уровень каждой статьи докторанта по теме исследования)	Основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, включая журналы из международных баз данных (Scopus, Web of Science), а также в изданиях, рекомендованных КОКССОН МНВО РК. Статьи отражают ключевые положения диссертации, отличаются новизной, полнотой изложения и соответствуют современным требованиям к академическим публикациям.	Опубликованные работы отражают актуальные направления в области наноматериалов и нанотехнологий, демонстрируют глубокое понимание темы, содержат оригинальные экспериментальные данные, анализ и выводы, что подтверждает высокий профессиональный уровень автора.
13.	Решение официального рецензента (согласно пункту 28 настоящего Типового положения)	Рекомендовать Комитету по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан присудить Толубаеву Канату Сайлаужановичу степень доктора философии (PhD).	

Заключение: Диссертационная работа на тему: «Исследование и разработка перспективного метода синтеза кремния для литий-ионных аккумуляторов», представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «8D07101 – Нанотехнологии в инженерии» Толубаева Каната Сайлаужановича является завершённым самостоятельным научным исследованием, выполненным на актуальную тему. В работе получены новые результаты, обладающие теоретической и практической значимостью. Представленные выводы и положения обоснованы и подтверждены экспериментальными данными. Несмотря на отдельные замечания, диссертация в целом соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени доктора философии (PhD). Рекомендую Комитету по

обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан присудить
Толубаеву Канату Сайлаужановичу степень доктора философии (PhD).

**К.т.н, PhD, член-корр. НИА РК,
руководитель Национальной
научной лаборатории коллективного пользования
информационных и космических технологий
ИАИТ НАО «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»**

