

## ОТЗЫВ

Официального оппонента

на диссертационную работу Ермоченкова Ивана Максимовича

«Выращивание кристаллов диэлектриков из водных растворов при низкочастотном вибрационном воздействии на жидкую фазу», представленной на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

**Актуальность исследования.** Монокристаллы, благодаря своим функциональным характеристикам, обладают высоким потенциалом для применения в различных областях современной науки и техники, однако их относительно высокая стоимость и сложность производства негативно сказываются на привлекательности с точки зрения их промышленного использования. Поиск и исследование способов повышения производительности методов выращивания кристаллов способно решить эту проблему. Именно эту актуальную задачу по повышению производительности при выращивании кристаллов из растворов решал в диссертационной работе Ермоченков Иван Максимович.

**Целью** работы явилось исследование эффективности использования техники аксиальных низкочастотных вибраций для процессов выращивания кристаллов из водных растворов.

Успешное достижение поставленной в работе цели заключалось в проведении физического моделирования с применением модельного раствора и выращивании кристаллов  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  и  $\text{K}_2\text{Co}(\text{SO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$ , растворы которых существенно отличаются по своим физико-химическим свойствам, при различных условиях воздействия на жидкую фазу, а также, в исследовании структурных и оптических характеристик выращенных кристаллов.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

Автором показано, что применение аксиального низкочастотного вибрационного воздействия приводит к:

– изменению характеристик раствора, в частности, увеличению растворимости

$\text{Li}_2\text{MoO}_4$ ;

- изменению форм огранения выращиваемых кристаллов;
- повышению оптического и структурного качества выращиваемых кристаллов на примере кристаллов  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  и  $\text{K}_2\text{Co}(\text{SO}_4)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ .

**Практическая значимость** диссертационной работы заключалась в следующем:

- разработана методика повышения примесной чистоты препаратов, используемых для выращивания кристаллов  $\text{K}_2\text{Co}(\text{SO}_4)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ;
- разработан стенд для физического моделирования и выращивания кристаллов из водных растворов различными методами с возможностью установки роторной мешалки и химически инертного тела, осциллирующего с низкой частотой;
- показано, что техника аксиальных низкочастотных вибраций позволяет повысить объемную скорость выращивания при повышении структурного качества выращиваемых кристаллов.

**Общая характеристика диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, методической части, экспериментальной части, включающей 2 раздела, обсуждения результатов, итогов работы и списка цитируемых источников. Общий объем диссертационной работы составляет 113 страниц, включая 87 рисунков, 14 таблиц и библиографию, содержащую 67 наименований.

**Во введении** автор обосновал актуальности темы диссертационной работы, сформулировал цели и задачи диссертационной работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы. Обоснована надежность и достоверность полученных результатов. Указан личный вклад автора в диссертационную работу.

**Глава 1** является литературным обзором. В ней рассматриваются различные способы воздействия на массоперенос, традиционно применяемые при выращивании кристаллов из водных растворов. Описаны теоретические и практические аспекты применения вибрационного воздействия на процесс выращивания кристаллов из дисперсных фаз. Помимо этого автором обоснован выбор объектов исследования. Представлены известные характеристики кристаллов  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  и  $\text{K}_2\text{Co}(\text{SO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$  и их водных растворов. В конце главы приведен вывод из обзора литературы.

**В главе 2** автором приведено описание использованного оборудования и методов анализа выращенных кристаллов.

Приведено описание методики измерения вязкости растворов  $\text{K}_2\text{Co}(\text{SO}_4)_2$  и методики подготовки насыщенных растворов. Указано, что кристаллы  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  выращивались методами контролируемого отбора растворителя, а кристаллы  $\text{K}_2\text{Co}(\text{SO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$  – методом постепенного снижения температуры.

Описана методика анализа химического состава кристаллов, методов исследования спектров пропускания выращенных кристаллов  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  и  $\text{K}_2\text{Co}(\text{SO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$  видимой и ИК-областях, спектров комбинационного рассеяния. Описаны методика исследования поверхности выращенных кристаллов сканирующей электронной микроскопией, методика исследования дефектной структуры выращенных кристаллов методом «ямок травления».

В данной главе автором приводится описание разработанной методики повышения химической чистоты препаратов  $\text{K}_2\text{SO}_4$  методами перекристаллизации из водных растворов при испарении растворителя и постепенном.

**Глава 3** посвящена физическому моделированию процессов массопереноса в жидкой фазе при введении АНВ в модельный раствор. Автором исследовано воздействие осциллирующих тел различной геометрии на процесс массопереноса. В отличие от работ, ранее выполненных на кафедре химии и технологии кристаллов РХТУ им. Д.И. Менделеева по проблеме использования техники АНВ при выращивании кристаллов из расплавов, автор помимо стандартных плоского цилиндрического диска и диска с П-образной образующей, впервые предложил использовать комбинированное тело «диск + кольцо», пространственно удаленные друг от друга. При этом вибрирующий диск формировал вынужденные потоки вокруг растущего кристалла, а вибрирующее кольцо, расположенное на уровне пьедестала, формировало вынужденные потоки, растворяющие паразитные кристаллы на дне кристаллизатора. Определены оптимальные амплитудно-частотные характеристики вибрационного воздействия.

В **главе 4** автор приводит результаты исследования растворимости молибдата лития при АНВ активации жидкой фазы и результаты выращивания кристаллов  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  и  $\text{K}_2\text{Co}(\text{SO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$ . Диссертант показывает, что применение техники АНВ позволяет повысить весовую скорость выращивания кристаллов как в сравнении с кристаллами, выращенными в условиях естественной конвекции, так и в условиях роторного перемешивания раствора. Также приводятся результаты измерений структурных и оптических характеристик выращенных кристаллов.

**Глава 5** является обобщением результатов проделанной работы. Автор проводит анализ влияния различных факторов, как на процесс выращивания, так и на характеристики выращенных кристаллов  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  и  $\text{K}_2\text{Co}(\text{SO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$  при различных скоростях испарения растворителя и снижения температуры, соответственно, отмечает повышение оптического и структурного качества выращиваемых кристаллов.

## Основные замечания и вопросы по работе

1. В литературном оборе работы указано, что кристаллы молибдата лития выращивают из расплавов. При этом качество кристаллов выше, чем у полученных в работе.
2. С целью подтверждения структурного качества выращенных кристаллов автору следовало бы провести анализ кривых качания для доказательства монокристалличности образцов.
3. В названии диссертации заявлены «диэлектрики», но в работе не проведено измерение диэлектрических свойств выращенных кристаллов.
4. Текст диссертации отличается излишним лаконизмом в части описания технических подробностей описания некоторых экспериментов и обсуждения результатов взаимодействия вибрирующего тела с жидкой фазой.

Вышеперечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации, поскольку сделанная работа является законченным научным исследованием.

**Заключение о соответствии диссертационной работы требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.13 г. № 842 (далее – Положение), с учетом соответствия формуле специальности 05.27.06 Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники**

Диссертация Ермоченкова Ивана Максимовича «Выращивание кристаллов диэлектриков из водных растворов при низкочастотном вибрационном воздействии на жидкую фазу» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и в соответствии с п. 9 раздела II Положения и в ней изложены новые **научно-обоснованные технологические решения**, имеющие существенное значение для развития страны, а именно научно-обоснованного метода повышения производительности методов выращивания кристаллов из водных растворов для широкого ряда применений.

Рекомендовать использовать результаты работы Ермоченкова И.М. в следующих организациях Российской Федерации:

1. Постановка технологии выращивания монокристаллов в промышленных масштабах на базе ЗАО Научно-технический центр «Реагент».
2. Повышение эффективности производства монокристаллов солей Туттона на базе ФНИЦ «Кристаллография и фотоника».

Диссертационная работа обладает внутренним единством, логично построена, содержит новые научные результаты и положения, ее структура и содержание

соответствует заявленным целям исследования. Достоверность полученных результатов и положений подтверждена большим объемом проведенных исследований с использованием взаимодополняющих современных методов, а также применением при обработке и интерпретации полученных данных подходов, принятых в современной мировой научной практике. Основные научные результаты диссертации прошли апробацию и были представлены на российских и международных конференциях. Число публикаций автора соответствует критериям п. 13 раздела II Положения. Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации.

Таким образом, стоит заключить, что по своей актуальности, научной новизне и практической значимости, а также личному вкладу автора представленная диссертационная работа «Выращивание кристаллов диэлектриков из водных растворов при низкочастотном вибрационном воздействии на жидкую фазу» полностью отвечает требованиям раздела II Положения, а по формуле и области исследования соответствует специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники», охватывающей проблемы создания новых и совершенствования существующих технологий для изготовления и производства материалов электронной техники: полупроводников, диэлектриков, включающая проблемы и задачи, связанные с разработкой научных основ, физико-технологических и физико-химических принципов создания указанных материалов, научные и технические исследования и разработки в области технологии, моделирования, измерения характеристик указанных материалов и технологических сред, в диссертационной работе:

– В соответствии с областью исследований п.1. «Разработка и исследование физико-технологических и физико-химических принципов создания новых и совершенствования традиционных материалов и приборов электронной техники, включая полупроводники, диэлектрики, металлы, технологические среды и приборы микроэлектроники и функциональной электроники.» автором разработаны аппаратура и методика выращивания кристаллов из водных растворов с применением техники аксиальных низкочастотных вибраций;

– В соответствии с областью исследований п.4. «Разработка и исследование физико-технологических и физико-химических моделей новых материалов и приборов по п.1, технологических процессов их изготовления, а также моделей проектирования соответствующего технологического оборудования» диссертантом экспериментально исследованы характеристики массопереноса при различных амплитудно-частотных характеристиках вибрационного воздействия и геометрии осциллирующего тела;

– В соответствии с областью исследований п. 5. «Физико-химические исследования технологических процессов получения новых и совершенствования существующих материалов электронной техники» автором экспериментально установлены закономерности изменения оптических и структурно-чувствительных характеристик кристаллов, выращенных в условиях естественной и вынужденной конвекции;

Считаю, что по актуальности, научной новизне и личному вкладу автора диссертационная работа на тему «Выращивание кристаллов диэлектриков из водных растворов при низкочастотном вибрационном воздействии на жидкую фазу», представленная на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники» полностью соответствует требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор **Ермоченков Иван Максимович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники».

Официальный оппонент,  
Старший научный сотрудник  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института общей физики имени  
А.М. Прохорова Российской академии наук,  
к.т.н.

Кулебякин А.В.  
13.08.2019

Подпись Кулебякина Алексея Владимировича  
удостоверяю

ВРИО ученого секретаря ИОФ РАН



Ф.М.Н.

Глушков В.В.

Почтовый адрес:

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук

E-mail: kulebyakin@lst.gpi.ru

Телефон: +7 (499) 503-8777