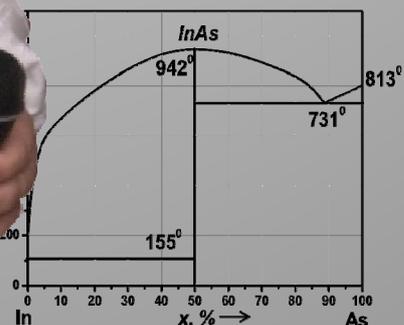
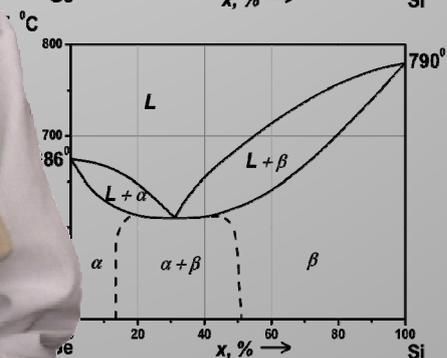
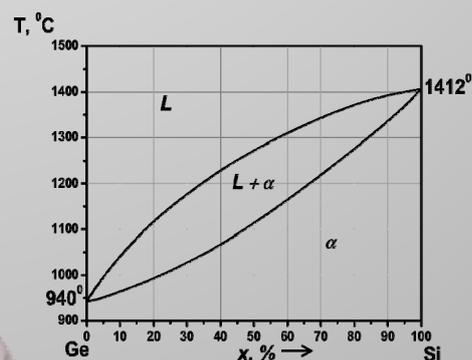
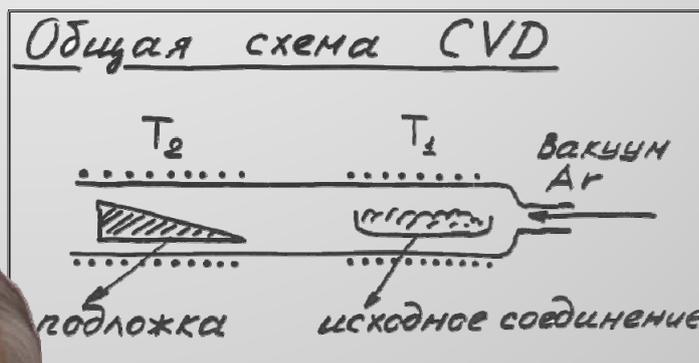


# Кузнецовские чтения - 2026



Сибирское отделение Российской академии наук  
Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск  
Научный совет РАН по неорганической химии

**Кузнецовские чтения-2026**  
**Восьмой семинар по проблемам**  
**химического осаждения**  
**из газовой фазы**

**2 – 4 февраля 2026 года**

**ПРОГРАММА И СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ**

Новосибирск, 2026

УДК 539.23

Программа и тезисы докладов «Кузнецовских чтений – 2026. Восьмого семинара по проблемам химического осаждения из газовой фазы» / Ответственный за выпуск к.х.н. М.Л. Косинова. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2026, 115 с.

В сборнике представлены тезисы докладов участников «Восьмого семинара по проблемам химического осаждения из газовой фазы», проведенного в 2026 году в ИНХ СО РАН, Новосибирск. Семинар проходил в рамках «Кузнецовских чтений», посвященных памяти и научному наследию российского учёного и организатора науки академика Федора Андреевича Кузнецова. Представленные доклады охватывают основные направления научно-исследовательских работ, проводимых при создании процессов получения функциональных пленок и покрытий методом химического осаждения из газовой фазы: фундаментальные основы процессов химического осаждения из газовой фазы, синтез и характеристика новых летучих соединений – перспективных исходных веществ для процессов CVD, проблемы формирования пленок и структур методами CVD, ALD, PVD, характеристика пленок и покрытий и определение областей их применения.

#### **Организационный комитет семинара:**

*Председатель* - К.А. Брылев, профессор РАН, д.х.н., ИНХ СО РАН, Новосибирск  
*Ученый секретарь семинара* - М.Л. Косинова, к.х.н., ИНХ СО РАН, Новосибирск

#### *Члены программного комитета:*

Т.В. Басова, д.х.н., профессор РАН, ИНХ СО РАН, Новосибирск  
В.Ю. Васильев, д.х.н., НГТУ, Новосибирск  
И.Г. Васильева, д.х.н., ИНХ СО РАН, Новосибирск  
Е.С. Викулова, к.х.н., ИНХ СО РАН, Новосибирск  
Н.Б. Морозова, д.х.н., ИНХ СО РАН, Новосибирск  
В.А. Кузнецов, к.т.н., ИНХ СО РАН, Новосибирск  
Н.Б. Морозова, д.х.н., ИНХ СО РАН, Новосибирск  
О.И. Семенова, к.х.н., ИФП СО РАН, Новосибирск

Место проведения – ИНХ СО РАН, Новосибирск

**ISBN 978-5-90168-857-1**

© ФГБУН

Институт неорганической химии  
им. А.В. Николаева

Сибирского отделения РАН, 2026



**Академик  
Федор Андреевич Кузнецов  
12.07.1932 – 4.02.2014**

Институт неорганической химии имени А.В. Николаева СО РАН в рамках Кузнецовских чтений, посвященных памяти и научному наследию российского учёного и организатора науки, академика Федора Андреевича Кузнецова, проводит Восьмой семинар по проблемам химического осаждения из газовой фазы. Данное мероприятие является продолжением серии семинаров, которые проходили в Иркутске (2010, 2013) и в Новосибирске (2011, 2017, 2020, 2022, 2024). Проведение уже Восьмого семинара в ИНХ СО РАН подтверждает развитие созданной академиком Ф.А. Кузнецовым научной школы по дизайну, исследованию и синтезу функциональных пленочных материалов. Возросшие потребности в новых материалах для развития электроники, авиастроения, атомной энергетики, медицины и экологии стимулирует разработку новых технических решений и высокоэффективных технологии. С этих позиций в программу Семинара включены как фундаментальные основы газозазных процессов, так внимание отдано и процессам, движущимся по пути от лабораторных экспериментов к промышленной технологии. На Семинаре будет отражен еще один важный аспект его деятельности - становление в институте материаловедения.

Основные разделы Семинара с конкретизацией их наполнения представлены ниже:

1. Фундаментальные основы процессов CVD (химия газовой фазы и поверхности, механизмы реакций, кинетика, моделирование, взаимосвязь структуры и свойств).
2. Новые исходные вещества для процессов CVD: синтез, очистка и характеристика.
3. Новые направления в развитии технологии газозазных процессов (активированные процессы CVD, ALD, гибридные технологии, процессы селективного осаждения и др.).
4. Новые материалы, сложные структуры, гибридные и многофункциональные системы, полученные в процессах CVD (однородные и градиентные пленки, напряженные слои, структуры различной архитектуры: нанотрубы, нанонити, нанокомпозиты, наночастицы, квантовые точки и т.д.).
5. Диагностика пленок и покрытий, контроль процессов CVD (контроль процессов превращения компонентов газовой фазы, состояние образующихся фаз, функциональные характеристики слоев и структур, стабильность пленок).
6. CVD: путь от лаборатории к промышленной технологии.
7. Тонкие пленки и наноструктуры, полученные методом PVD: рост, характеристика, моделирование.
8. Применение процессов CVD, ALD и PVD (микро, нано- и оптоэлектроника, химические сенсоры, катализ, производство энергии, оптические и защитные покрытия и др.).

Выпускаемый сборник тезисов участников семинара включает около 90 работ, они посвящены не только развитию фундаментальных основ процесса CVD. Здесь достойно представлены другие процессы осаждения, такие как ALD, PECVD, PVD, часто с оригинальным способом решения технологических задач. Уделено внимание проблеме получения новых летучих соединений. Много внимания уделено методам диагностики пленок и покрытий, с позиций увеличения точности управления составом, структурой и геометрией синтезируемых материалов. Стремление к многопрофильности науки, заложенное Ф.А. Кузнецовом и дающее мощный толчок развитию науки, хорошо отражают представленные тезисы.

Вовлечение сложных летучих соединений различных классов в технологию материалов и структур потребовало создания новой, междисциплинарной области деятельности. Ф.А. Кузнецов вложил много сил в развитие научного сотрудничества, и это направление продолжает активно развиваться. Материалы Восьмого семинара, отражающие развитие фундаментальной и прикладной науки процессов газозазного осаждения, без сомнения востребованы и ценны, тем более что мы рассматриваем их с позиций огромной заслуги и научного наследия академика Ф.А. Кузнецова.

Васильева И.Г.  
Косинова М.Л.

## СПОНСОРЫ СЕМИНАРА



Институт неорганической  
химии имени А.В. Николаева СО  
РАН,  
г. Новосибирск



Единая группа компаний  
ООО "ЛАБСПЕЙС" и  
"ГРАУЛАБ"  
г. Томск



ООО «ВИЛИТЕК»  
г. Москва



Инжиниринговый химико-  
технологический центр  
г. Томск

## ПРОГРАММА

02 февраля 2026

### Сессия 1.

#### Кузнецовские чтения

- 09:00–09.20**      **Открытие семинара**  
проф. РАН, д.х.н. К.А. Брылев, директор ИНХ СО РАН  
к.х.н. М.Л. Косинова, зав. лабораторией, ИНХ СО РАН
- 09:20–09.50**      **И.Г. Васильева, ИНХ СО РАН, Новосибирск**  
Физико-химические основы выращивания структурно-совершенных  
технически важных монокристаллов  
*Приглашенный доклад*
- 09:50–10:20**      **Н.И. Мацкевич, В.Н. Шлегель, С.В. Станкус, А.Н. Семерикова, ИНХ СО РАН, Новосибирск**  
Синтез и термодинамические исследования многофункциональных  
материалов на основе оксидов переходных элементов (Mo, W, Co)  
для различных приложений  
*Приглашенный доклад*
- 10:20–10:50**      **А.Ю. Манаков, Т.В. Родионова, ИНХ СО РАН, Новосибирск**  
Газогидратные исследования в рамках интеграционных проектов  
СО РАН  
*Приглашенный доклад*
- 10:50–11:20**      **С.А. Харитонов, НГТУ, Новосибирск**  
Силовая электроника Сибири: вчера, сегодня и завтра  
*Приглашенный доклад*
- 11:20–11:40**      **Кофе/чай**

### Сессия 2

#### Фундаментальные основы процессов CVD и PVD

**Председатель:** д.х.н. Н.Б. Морозова, ИНХ СО РАН, Новосибирск

- 11:40–12:00**      **И.В. Мирзаева, Р.Э. Афаунов, С.Г. Козлова, ИНХ СО РАН, НГУ, Новосибирск**  
Топологические характеристики связей металл-лиганд в  
потенциальных прекурсорах МОСVD как основа для предсказания их  
энергетики  
и свойств
- 12:00–12:20**      **А.М. Макаренко, К.В. Жерикова, ИНХ СО РАН, Новосибирск**  
Термодинамика фазовых переходов  $\beta$ -дикетонатов металлов как  
основа контроля их парообразования в процессах МОСVD
- 12:20–12:40**      **В.С. Поломских, А.А. Дудин, Г.А. Рудаков, ИНМЭ РАН, Москва**  
Химико-кинетическая модель LAFOR для описания зависимости роста  
пленки от технологических параметров процесса атомно-слоевого  
осаждения
- 12:40–13:00**      **Д.А. Вавилкин, Н.А. Небогина, А.Е. Жимарева,**  
Спонсор ООО "ЛАБСПЕЙС&ГРАУЛАБ", Томск
- 13:00**              **Обед**

### Сессия 3

#### Новые исходные вещества для процессов CVD: синтез, очистка и характеристика

Председатель: проф., д.х.н. В.Ю. Васильев, НГТУ, Новосибирск

- 14:00–14:30** **К.В. Жерикова**, *ИНХ СО РАН, Новосибирск*  
Фазовая термодинамика МОСVD предшественников: фундаментальные и прикладные аспекты на примере медных комплексов  
*Приглашенный доклад*
- 14:30–14:50** **С.И. Доровских, В.А. Ятыгин, А.С. Сухих, А.М. Макаренко, Д.П. Пищур, С.В. Сысоев, К.В. Жерикова, Е.С. Викулова**, *ИНХ СО РАН, НГУ, Новосибирск*  
Фторированные разнолигандные комплексы кобальта(II) для газофазного осаждения фторидных и оксидных наноматериалов
- 14:50–15:10** **В.В. Крисюк**, *ИНХ СО РАН, Новосибирск*  
Гетерометаллические бета-дикетонаты как прекурсоры для МОСVD многокомпонентных плёнок
- 15:10–15:30** **С. Уркасым кызы, А.Е. Тургамбаева, А.С. Сухих, С.В. Сысоев, И.К. Игуменов, В.В. Крисюк**, *ИНХ СО РАН, Новосибирск*  
Синтез, структура и термические свойства летучих бета-дикетонатов ниобия
- 15:30–15:50** **Е.С. Викулова, С.И. Доровских, Н.Б. Морозова**, *ИНХ СО РАН, Новосибирск*  
Современная химия летучих комплексов циркония и гафния для осаждения оксидных наноматериалов
- 15:50–16:10** **Кофе/чай**

### Сессия 4

#### Новые направления в развитии технологии газофазных процессов

Председатель: проф. РАН, д.х.н. Т.В. Басова, ИНХ СО РАН, Новосибирск

- 16:10–16:40** **К.В. Руденко, А.В. Мяконьких, А.Е. Рогожин**, *НИЦ «Курчатовский институт», ОФТИ, Москва*  
Атомно-слоевое осаждение и структурирование пленок рутения для наноэлектроники в планарном и 3D варианте  
*Приглашенный доклад*
- 16:40–17:00** **Б.В. Волошин, В.А. Селезнев, В.А. Голяшов**, *ИФП СО РАН, Новосибирск*  
Синтез тонких пленок оксидов ванадия методом импульсного плазменно-стимулированного химического осаждения
- 17:00–17:20** **А.С. Гудовских, А.В. Уваров, А.И. Баранов, Е.А. Вячеславова, А.А. Максимова, Э.Я. Ярчук**, *СПбАУ РАН, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург*  
Плазмохимическое осаждение слоев InP
- 17:20–17:40** **С.Г. Гаджимурадов, С.И. Сулейманов, И.М. Абдулагатов, А.И. Абдулагатов**, *ДГУ, ИФ ДФИЦ РАН, ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала*  
Экспериментальное и теоретическое исследование путей реакций в процессах МН  $MCr_xO_y$  (M = Zn, Al, Ti)
- 17:40–18:00** **В.В. Лукашов, И.К. Игуменов, Р.А. Шутилов**, *ИТ СО РАН, ИНХ СО РАН, Новосибирск*  
Динамика сублимации микрочастиц в закрученном потоке газа на примере  $Zr(dpm)_4$

## 03 февраля 2026

### Сессия 5. Новые направления в развитии технологии газофазных процессов

Председатель: к.х.н. Е.С. Викулова, ИНХ СО РАН, Новосибирск

- 09:00–09:20** **А.В. Петрова, А.И. Сафонов, ИТ СО РАН, Новосибирск**  
Осаждение фторполимерных покрытий методом NW CVD при разбавлении газа-предшественника инертным газом
- 09:20–09:40** **А.С. Митулинский, А.В. Гайдайчук, С.П. Зенкин, С.А. Линник**  
*НИ ТПУ, Томск*  
Осаждение тонких пленок  $Al_2O_3$  методом CVD с использованием изопропилата алюминия
- 09:40–10:00** **М.С. Лебедев, ИХ СО РАН, Новосибирск**  
Особенности роста и структуры пленок оксида самария, полученных попеременной обработкой поверхности парами трис-изопропилциклопентадиенила самария (III) и воды
- 10:00–10:20** **Е.Д. Стрикалов, Д.Ю. Волков, М.В. Меш, А.М. Меш, Ю.С. Кольцов,**  
*СПбГТИ(ТУ), АО "СКТБ Кольцова", Санкт-Петербург*  
Методы маскирования изделий при нанесении покрытий методом молекулярного напыления
- 10:20–10:40** **Н.В. Александров, Е.П. Кириленко, А.В. Горячев, А.А. Дудин,**  
**С.С. Зюзин, Г.А. Рудаков, ИИМЭ РАН, НИТУ МИСИС, АО НИИМЭ,**  
*Москва*  
Комплексные исследования тонких плёнок оксидов Ti и Hf при отработке процессов атомно-слоевого осаждения
- 10:40–11:00** **Кофе/чай**

### Сессия 6

#### Новые материалы и сложные структуры, полученные в процессах CVD

Председатель: к.х.н. О.И. Семенова, ИФП СО РАН, Новосибирск

- 11:00-11:30** **М.Н. Маркелова, И.Э. Грабой, А.А. Хафизов, А.Р. Кауль, МГУ, Москва**  
MOCVD материалов спинтроники  
*Приглашенный доклад*
- 11:30-11:50** **К.Е. Капогузов, С.В. Мутилин, С.В. Белая, В.Н. Кичай,**  
**Л.В. Яковкина, И.В. Корольков, А.А. Сараев, М.Л. Косинова,**  
*ИФП СО РАН, НГУ, ИНХ СО РАН, Новосибирск*  
Стабильные резистивные переключения в пленках  $VO_2$ , синтезированных на вертикальных наностенках h-BCN
- 11:50–12:10** **Е.А. Хижняк, И.В. Юшина, М.С. Лебедев, В.Р. Шаяпов, ИХ СО РАН,**  
*Новосибирск.* Установление взаимосвязи между фазовым составом и оптическими свойствами в оксидных системах  $HfO_2-TiO_2$  и  $ZrO_2-TiO_2$ , полученных методом атомно-слоевого осаждения
- 12:10–12:30** **Э.А. Рихтер, И.В. Корольков, И.К. Игуменов, Е.С. Викулова, ИХ СО**  
*РАН, Новосибирск.* Изучение вторичной электронной эмиссии диэлектрических материалов, полученных методами MOCVD и ALD
- 12:30-12:50** **Ш.М. Исубгаджиев, Р.Р. Амашаев, ДГУ, ООО «Технологии АСО**  
*покрытий», Махачкала*  
Разработка и оптимизация защитного покрытия на основе  $Al_2O_3-TiO_2$  для сохранения серебряных изделий с применением технологии атомно-слоевого осаждения
- 13:00** **Обед**

## Сессия 7

### Диагностика пленок и покрытий, контроль процессов CVD

Председатель: К.В. Руденко, НИЦ «Курчатовский институт», ОФТИ, Москва

- 14:00–14:30 **А.Г. Милёхин, И.А. Милёхин, А.В. Тараненко, Л.С. Басалаева, К. Киселев, Н.Н. Курусь, Р.Б. Васильев, А.В. Царев, Л.Н. Дворецкая, Э.О. Чиглинецв, А.И. Чернов, А.В. Латышев,**  
*ИФП СО РАН, НГУ, МГУ, СПБАУ РАН, МФТИ, РКЦ, Новосибирск, Москва, Санкт-Петербург*  
Оптическая наноскопия полупроводниковых наноструктур  
*Приглашенный доклад*
- 14:30–15:00 **О.И. Семенова,** *ИФП СО РАН, Новосибирск*  
Полупроводниковые перовскиты в современной оптоэлектронике  
*Приглашенный доклад*
- 15:00–15:20 **А.И. Баранов, А.В. Уваров, Е.А. Вячеславова, А.А. Максимова, О.П. Михайлов, В.А. Поздеев, Э.Я. Ярчук, А.С. Гудовских,**  
*СПБАУ РАН, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург*  
Емкостная спектроскопия гетерограницы между кремнием и слоями оксида галлия и алюминия, выращенных методом ALD
- 15:20–15:40 **О.К. Иванова, С.А. Божко, Д.А. Подгорный,** *НИТУ «МИСИС», ООО «Маппер», Москва*  
Исследование нанопористости слоев нитрида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения из газовой фазы
- 15:40–16:00 **А.С. Потылицын**  
Спонсор «ВИЛИТЕК» ООО, Москва
- 16:00–16:20 **Кофе/чай**

## Сессия 8

### Тонкие пленки и наноструктуры, полученные методами PVD: рост, характеристика, моделирование

Председатель: к.х.н. С.И. Доровских, ИНХ СО РАН, Новосибирск

- 16:20–16:50 **Т.В. Басова, Д.В. Бонегардт, Д.Д. Клямер, А.С. Сухих,** *ИНХ СО РАН, Новосибирск*  
Галогензамещенные фталоцианины металлов: влияние молекулярного строения на структурные особенности и сенсорные свойства пленок  
*Приглашенный доклад*
- 16:50–17:10 **Д.В. Бонегардт, Е.П. Пинчукова, А.С. Сухих, Д.Д. Клямер, Т.В. Басова,** *ИНХ СО РАН, НГУ, Новосибирск*  
Формирование сокристаллов и смешанных пленок на основе тетрафторофталоцианина кобальта и незамещенного фталоцианина цинка
- 17:10–17:30 **А.Л. Богословцева, В.Р. Шаяпов, С.Ю. Чепкасов, М.И. Миронова, А.В. Капишников, В.А. Володин, Д.В. Марин, П.В. Гейдт,** *НГУ, ИНХ СО РАН, Новосибирск*  
Особенности строения пленок нитрида алюминия, полученных методом импульсного магнетронного распыления
- 17:30–18:30 **Стендовая сессия.**

## 4 февраля 2026

### Сессия 9

#### Диагностика пленок и покрытий, контроль процессов CVD

Председатель: к.х.н. Е.Н. Ермакова, *ИНХ СО РАН, Новосибирск*

- 09:00–09:30** **В.А. Кузнецов**, *ИНХ СО РАН, НГТУ, Новосибирск*  
Развитие подходов по созданию электропроводящих полимерных композиционных материалов для электроники  
*Приглашенный доклад*
- 09:30–09:50** **М.А. Новиков, К.М. Попов, В.И. Сысоев, А.В. Окотруб**,  
*ИНХ СО РАН, НГУ, Новосибирск*  
Влияние предварительной обработки медной фольги на структуру и дефектность CVD-графена
- 09:50–10:10** **А.Н. Колодин, Е.А. Зайцева**, *ИНХ СО РАН, НГУ, Новосибирск*  
Исследование анизотропии поверхностных и магнитных свойств с помощью магнитно-силовой микроскопии
- 10:10–10:30** **Д.М. Милушин, К.Е. Капогузов, В.С. Тумашев, Е.К. Багочус, В.Н. Кичай, Л.В. Яковкина, С.В. Мутилин**, *ИФП СО РАН, НГУ, ИНХ СО РАН, Новосибирск*  
Энергоэффективные резистивные переключатели на основе поликристаллических пленок диоксида ванадия, синтезированных методом химического осаждения из газовой фазы
- 10:30–10:50** **А.А. Хафизов, Ж. Гу, М.Н. Маркелова, Д.А. Волков, Д.А. Габриелян, А.Р. Сафин, А.Л. Васильев, А.Р. Кауль**, *МГУ, ИРЭ, НИЦ «Курчатовский Институт», Москва*  
Эпитаксиальные пленки  $\text{Lu}_{3+x}\text{Fe}_{5-x}\text{O}_{12}$ : МОСVD-синтез и взаимосвязь состав-структура-свойства
- 10:50–11:10** **Кофе/чай**

### Сессия 10

#### Применение процессов CVD, ALD и PVD

Председатель: к.т.н. В.А. Кузнецов, *ИНХ СО РАН, Новосибирск*

- 11:10–11:30** **С.В. Белая**, *ИНХ СО РАН, Новосибирск*  
Синтез слоев BCN, в том числе в составе композитов, для практического применения
- 11:30–11:50** **А.С. Мокрушин, С.А. Дмитриева, А.Р. Стройкова, Н.П. Симоненко, Е.П. Симоненко**, *ИОНХ РАН, МГУ, РХТУ, Москва*  
Использование газофазных методов для формирования чувствительных слоёв хеморезистивных газовых сенсоров
- 11:50–12:10** **С.А. Дмитриева, А.С. Мокрушин, Н.П. Симоненко, Е.П. Симоненко**, *МГУ, ИОНХ РАН, Москва*  
Использование аэрозольного осаждения из газовой фазы для формирования тонких плёнок на основе ZnO
- 12:10–12:30** **К.П. Бурдина, А.Н. Аксенов, А.В. Тюньков, Ю.Г. Юшков, О.В. Андреев**, *ПАО «Тюменские моторостроители», ТИУ, ТГУСУиР, ТГУ, ИХТТ УрО РАН, Тюмень, Томск, Екатеринбург*  
Формирование многослойного защитного покрытия для лопаток турбины ГТД с использованием методов газофазного насыщения и электронно-лучевого осаждения керамических конденсатов
- 12:30–12:50** **Г.С. Морозов**, *АО НИЦ "Инкомсистем", Казань*  
Опыт масштабирования мелкосерийной технологии LPCVD от НИОКР до завода
- 13:00** **Обед**

## Сессия 11

### Применение процессов CVD, ALD и PVD

**Председатель:** д.х.н. И.Г. Васильева, ИНХ СО РАН, Новосибирск

- 14:00–14:30** **В.Ю. Васильев**, НГТУ, Новосибирск  
CVD пленки борофосфоросиликатного стекла в современных технологиях ИМС, МЭМС, МОЭМС - ОБЗОР  
*Приглашенный доклад*
- 14:30–15:00** **Д.В. Назаров, Л.А. Козлова, В.В. Вартиайнен, А.П. Годун, Н.М. Юдинцева, М.Ю. Максимов**, СПбГУ, СПбПУ Петра Великого, ИЦ РАН, Санкт-Петербург  
Атомно-слоевое осаждение оксидных покрытий для регулирования биомедицинских свойств металлических материалов  
*Приглашенный доклад*
- 15:00–15:20** **И.С. Ежов, А.А. Попович, М.Ю. Максимов**, СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург  
Технологические особенности получения покрытий оксида никеля методом молекулярного наслаивания с использованием NiCr<sub>2</sub> и O<sub>3</sub>
- 15:20–15:40** **Ю.С. Реутова, А.В. Чернышев, Н.А. Волошин, А.В. Метелица**, ЮФУ, Ростов-на-Дону  
Тонкие пленки комплексов спиропирана и β-дикетонатов металлов: газофазный синтез и свойства
- 15:40–16:00** **В.С. Балахнин, Д.В. Володина, Е.Д. Подкопаева, З.С. Балыш, С.К. Бочковский**, Инжиниринговый центр молекулярного наслаивания, Санкт-Петербург  
Математическое моделирование процесса молекулярного наслаивания в установке проточно-вакуумного типа УМН-30
- 16:00** **Кофе/чай**

## Сессия 12

### Кузнецовские чтения

**Председатель:** к.х.н. М.Л. Косинова, ИНХ СО РАН, Новосибирск

- 16:20–16:40** **Р.А. Шугилов, В.В. Лукашов, А.Г. Маликов, М.А. Гулов, А.Н. Аксенов, И.К. Игуменов**, ИНХ СО РАН, ИТ С РАН, ИТПМ СО РАН, ОАО «Тюменские моторостроители», Новосибирск, Тюмень  
Модифицирование поверхности металлических порошков для аддитивных технологий с использованием процессов химического осаждения из газовой фазы
- 16:40–17:00** **О.В. Седельникова, Д.В. Городецкий, О.Г. Поддубская, А.В. Окотруб**, ИНХ СО РАН, ИЯП БГУ, Новосибирск, Минск  
Углеродные метаматериалы для терагерцовой оптики
- 17:00–17:20** **В.Р. Шаяпов, Е.А. Хижняк, М.С. Лебедев**, ИНХ СО РАН, Новосибирск  
Спектроскопические исследования пленок Hf<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>2</sub> и Zr<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>2</sub>, полученных методом атомно-слоевого осаждения
- 17:20–17:40** **Е.Н. Ермакова, М.Л. Косинова**, ИНХ СО РАН, Новосибирск  
Влияние строения прекурсора на состав, строение и диэлектрические свойства PECVD пленок системы Si–C–N–O–H
- 17:40–18:00** **В.С. Суляева, М.Л. Косинова**, ИНХ СО РАН, Новосибирск  
Борорганические соединения – прекурсоры для CVD-синтеза аморфных и наноструктурированных пленок BN, BCN и SiBCN
- 18:00** **Заккрытие семинара**

3 февраля.

Стендовая сессия

- 01. Р.Э. Афаунов, И.В. Мирзаева, ИИХ СО РАН, НГУ, Новосибирск**  
Описание связей металл-лиганд методом EDA-NOCV
- 02. Г.З. Багаматов, И.М. Абдулагатов, А.И. Абдулагатов, А.М. Максумова, Н.А. Ашурбеков, Г.Ш. Шабанович, М.З. Закарьяева, ДГУ, ИПГУВЭ - филиал ОИВЭ РАН, ФГБУН ДФИЦ РАН, Махачкала**  
Разработка экспериментальной установки плазмо-стимулированного атомно-слоевого наложения для получения наноплёнок при низких температурах
- 03. А.А. Бакунова, А.Л. Каменева, ПНИПУ, Пермь**  
Микроструктурные модели роста тонкопленочных покрытий, наносимых методом PVD
- 04. Д.П. Борисенко, А.А. Галиуллин, Д.А. Матиенко, К.А. Досов, М.Г. Рыбин, ООО «РУСГРАФЕН», Оболенск, НИУ ВШЭ, ФИАН, Москва**  
CVD оборудование с внутренней нагреваемой конструкцией и охлаждаемыми стенками для синтеза графена и других двумерных материалов
- 05. В.В. Бочаров, ИИХ СО РАН, ИК СО РАН, Новосибирск**  
Сравнение методов получения оптически активных пленок AG-AOT: метод «dip-coating» и метод CVD
- 06. С.Е. Варваринская, Е.С. Викулова, И.Ю. Ильин, Т.С. Сухих, Д.П. Пищур, Н.А. Крючкова, Н.Б. Морозова, А.А. Жеравин, ИИХ СО РАН, НГУ, НМИЦ, Новосибирск**  
Синтез и исследование комплексов Ag(I) с  $\alpha, \alpha'$ -бипиридилом и  $\beta$ -дикетонатными лигандами для применения в MOCVD
- 07. Е.А. Вячеславова, Д.В. Мохов, А.И. Баранов, А.С. Гудовских, СПбАУ РАН, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург**  
Формирование наноструктур черного кремния в плазме SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> при криогенных температурах
- 08. Д.В. Горина, И.Ю. Ильин, Т.С. Сухих, И.А. Подоляко, Е.С. Викулова, ИИХ СО РАН, НГПУ, ИК СО РАН, НГУ, Новосибирск**  
Влияние удлинения (перфтор)алкильной цепи на строение и термические свойства летучих  $\beta$ -дикетонатных комплексов иридия(I) с 1,5-циклооктадиеном
- 09. Д.В. Городецкий, О.В. Седельникова, Ю.В. Федосеева, Е.В. Лисица, М.А. Зимин, Р.С. Ерофеев, А.Д. Федоренко, А.В. Гусельников, А.В. Окотруб, ИИХ СО РАН, Новосибирск**  
Детектирование рентгеновского и оптического излучения с использованием модифицированных поликристаллических алмазных пленок
- 10. У.М. Дамыров, С.Г. Гаджимурадов, И.М. Абдулагатов, ДГУ, ООО «АСТ ТЕХНОЛОГИИ ТРАВЛЕНИЯ», Махачкала**  
Разработка технологической платформы термического атомно-слоевого травления для нанoeлектроники

**11. А.С. Дациев, С.Г. Гаджимурадов, С.И. Сулейманов, У.М. Дамыров, А.М. Максумова, И.М. Абдулагатов, А.И. Абдулагатов, ДГУ, ИФ ДФИЦ РАН, ИПГиВЭ – филиал ОИВТ РАН, Махачкала**

Поверхностная химия взаимодействия  $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$  с  $\text{Zn}(\text{Et})_2$  и  $\text{Al}(\text{Me})_3$  в процессах молекулярного наслаивания

**12. С.С. Етмишева, А.М. Максумова, И.М. Абдулагатов, ДГУ, Махачкала**

Термическое атомно-слоевое осаждение смешанных алюминий-молибденовых оксидных пленок с использованием  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{MoO}_2\text{Cl}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$

**13. В.Б. Калинина, К.Е. Капогузов, И.А. Азаров, А.Е. Гайдук, В.Н. Кичай,**

**Л.В. Яковкина, С.В. Мутилин, НГУ, ИФП СО РАН, ИНХ СО РАН, Новосибирск**

Исследование электрооптических переключений в CVD-синтезированных тонких пленках диоксида ванадия методами эллипсометрии

**14. Т.А. Камдина, Д.В. Бонегардт, Д.Д. Клямер, ИНХ СО РАН, НГУ, Новосибирск,**

Исследование октахлорзамещенных фталоцианинов металлов как активных слоев для хеморезистивных сенсоров аммиака

**15. Д.В. Кочелаков, Е.С. Викулова, Н.В. Куратьева, С.В. Сысоев, Д.Б. Каюмова, И.П. Малкерова, А.С. Алиханян, ИНХ СО РАН, ИОНХ РАН, Новосибирск, Москва**

Получение летучих комплексов щелочных металлов на примере  $\beta$ -дикетонатных производных калия

**16. С.С. Крутских, Е.С. Викулова, Б.Ю. Савков, М.Ю. Афонин, Д.П. Пищур, Л.Н. Зеленина, ИНХ СО РАН, НГУ, Новосибирск**

Термодинамическое исследование летучих алкиламидов гафния (IV) – прекурсоров для атомно-слоевого осаждения

**17. Е.В. Лисица, А.Д. Панфилова, Ю.В. Федосеева, А.А. Загузина, А.В. Окотруб, Л.Г. Булушева, ИНХ СО РАН, Новосибирск**

Взаимосвязь между структурными характеристиками пористого углеродного материала, допированного азотом, и его поведением в литий-ионном конденсаторе

**18. А.А. Максимова, Е.А. Вячеславова, А.И. Баранов, А.В. Уваров, О.П. Михайлов,**

**В.А. Поздеев, Э.Я. Ярчук, А.С. Гудовских, СПбАУ РАН, СПбГЭТУ ЛЭТИ, Санкт-Петербург**

Применение тонких слоев  $\text{MoO}_x$  для пассивации наноструктурированной поверхности кремния

**19. А.М. Максумова, М.Н. Гафурова, С.Г. Гаджимурадов, А.И. Абдулагатов, И.М. Абдулагатов, ФГБОУ ВО ДГУ, Махачкала**

Атомно-слоевое осаждение нанопокровов на основе диоксида титана, легированного атомами металлов, на поверхность фильтрующих материалов для использования в многоразовых современных системах очистки воды

**20. А.С. Митулинский, А.В. Гайдайчук, С.П. Зенкин, С.А. Линник, НИ ТПУ, Томск**

Определение дальнего кристаллического порядка в структуре нанокристаллических CVD-алмазных пленок

**21. Н.В. Первухина, И.А. Байдина, С.А. Громилов, ИНХ СО РАН, Новосибирск**

Кристаллохимический анализ молекулярных комплексов Ir(I) и Ir(III) с  $\beta$ -дикетонат-ионами

- 22. У.Ю. Пигалина, М.А. Аксенова, Э.А. Рихтер, Д.В. Кочелаков, Е.С. Викулова, НГУ, ИИХ СО РАН, Новосибирск**  
Синтез, строение и термические свойства комплексов трифторацетилацетоната магния с 2,2'-бипиридином и 1,10-фенантролином
- 23. А.Г. Плеханов, Е.Н. Ермакова, В.Р. Шаяпов, Е.А. Максимовский, М.Л. Косинова, ИИХ СО РАН, Новосибирск**  
Роль состава газовой смеси в управлении диэлектрическими свойствами PECVD пленок SiOCH
- 24. В.О. Рябов, В.А. Андрущенко, НГУ, ИТ СО РАН, Новосибирск**  
Разработка МТР потенциала для моделирования CVD синтеза графена
- 25. А.В. Сартакова, С.В. Сысоев, А.М. Макаренко, Е.С. Викулова, К.В. Жерикова, А.А. Жеравин, ИИХ СО РАН, ФГБУ НМИЦ, Новосибирск**  
Термодинамическое исследование  $\beta$ -дикетонатных комплексов меди(II) и индия(III) для индивидуального и совместного осаждения в MOCVD-процессах
- 26. Ю.В. Серова, А.В. Стригуновская, Э.А. Рихтер, Д.В. Кочелаков, А.А. Сухих, Е.С. Викулова, ИИХ СО РАН, НГУ, Новосибирск**  
Летучие разнолигандные комплексы магния: влияние нефторированного  $\beta$ -дикетоната на строение и свойства
- 27. Б.А. Ситчихин, Б.Ю. Савков, И.Ю. Ильин, А.С. Сухих, Д.П. Пищур, Е.С. Викулова, ИИХ СО РАН, НГУ, Новосибирск**  
N-метоксиметилпропанамидат гафния ( $\square$ ): новый летучий прекурсор для осаждения слоев HfO<sub>2</sub>
- 28. А.В. Стригуновская, Э.А. Рихтер, К.А. Виноградова, Д.В. Кочелаков, А.С. Сухих, Е.С. Викулова, ИИХ СО РАН, НГУ, Новосибирск**  
Комплексы магния с нефторированными  $\beta$ -дикетонами: влияние ароматического нейтрального лиганда на строение и свойства
- 29. А.А. Урбах, Л.Н. Зеленина, Е.Н. Ермакова, ИИХ СО РАН, НГУ, Новосибирск**  
Термодинамическое исследование винилметилдиэтоксисилана
- 30. Ю.В. Федосеева, В.И. Сысоев, Г.И. Семушкина, С.А. Лаврухина, Е.В. Лисица, О.А. Гурова, Е.А. Максимовский, Л.Г. Булушева, А.В. Окотруб, ИИХ СО РАН, Новосибирск**  
Модификация одностенных углеродных нанотрубок тетрацианохинодимером с использованием ампульного метода для детектирования газов
- 31. С.Я. Хмель, В.А. Пинаев, А.В. Петрова, А.И. Сафонов, Е.А. Максимовский, В.С. Суляева, А.Д. Федоренко, ИТ СО РАН, ИИХ СО РАН, ЦКП «СКИФ», Новосибирск, Кольцово**  
Модификация поверхности политетрафторэтилена низкочастотной индуктивно связанной аргоновой плазмой
- 32. М.Н. Чагин, Е.Н. Ермакова, В.Р. Шаяпов, Е.А. Максимовский, М.Л. Косинова, ИИХ СО РАН, Новосибирск**  
Аморфные пленки SiO<sub>x</sub>C<sub>y</sub>:H, полученные в процессе PECVD из паров аллилокси(триметил)силана и гексаметилдисилоксана

**33. А.А. Шадрина, С.И. Доровских, А.М. Макаренко, Д.П. Пищур, Е.С. Викулова,**  
*ИНХ СО РАН, НГТУ, Новосибирск*

Летучие разнолигандные комплексы цинка с  $\beta$ -дикетонами и N,N,N',N'-тетраметилэтилендиамином: синтез и термические свойства

**34. Е.А. Зайцева,** *ИНХ СО РАН, НГУ, Новосибирск*

Синтез и характеристика органоэтей оксида железа(III), стабилизированных АОТ

**35. А.Г. Киселевич, Е.А.Соснов,** *СПбГТИ(ТУ), АО «НИИ «Феррит-Домен», Санкт-Петербург*

Применение электронной спектроскопии диффузного отражения для диагностики поверхностных структур

**36. А.С. Полуэктова, К.Ю.Киселев, У.О.Каясова, М. А. Тарасенко, М.В. Нешин,**  
**А.С. Макаров, В. В. Скудин,** *РХТУ, Москва*

CVD-метод при получении мембранных пористых катализаторов для кислородно-углекислотной конверсии метана

**37. И.С. Балахонцев, М.И. Ягофаров,** *К(П)ФУ, Казань*

Формирование сверхстабильных стекол органических полупроводников методом PVD: оценка относительной стабильности с помощью калориметрии растворения

## **УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ**

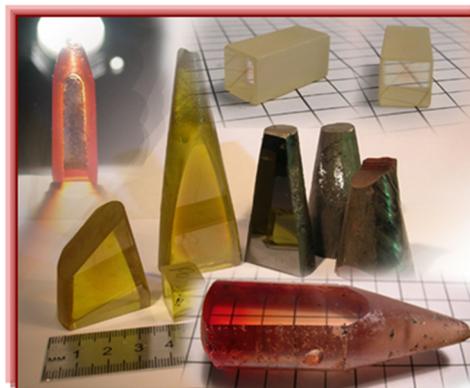
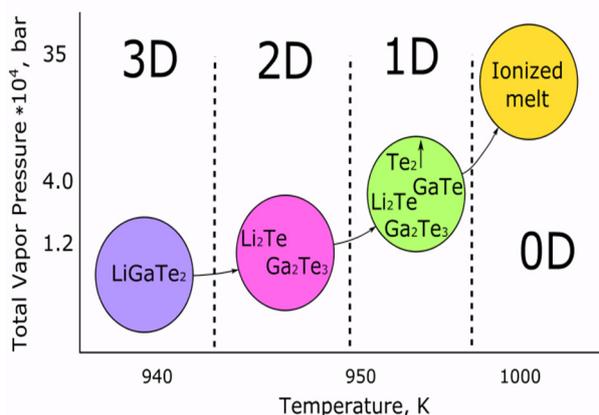
## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫРАЩИВАНИЯ СТРУКТУРНО-СОВЕРШЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИ ВАЖНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ

И.Г. Васильева

ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

kamarz@niic.nsc.ru

Рассматриваемые в докладе соединения  $\text{LiInSe}_2$ ,  $\text{LiGaTe}_2$ ,  $\text{La}_2\text{S}_3$ ,  $\text{ZnMoO}_4$ ,  $\text{ZnGeP}_2$  и  $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$  обладают уникальными и востребованными на практике функциональными свойствами, чья стехиометрия является гарантом структурного совершенства кристаллов и их оптимальных функциональных свойств. Однако специфика химической природы этих соединений (инконгруэнтное плавление и/или испарение, протяженность областей гомогенности) делает трудным выращивание их монокристаллов с высоким структурным совершенством, и потому исследование  $p$ - $T$ -х диаграмм состояния этих многокомпонентных систем становится актуальным. В докладе демонстрируется прогресс в понимании особенностей химической природы этих соединений, проявляющихся по-разному на разных стадиях ростового процесса. Для каждого объекта получена принципиально новая информация, чему способствовало использование трех оригинальных методов, статической тензиметрии, высокоскоростного, высокотемпературного термоанализа и дифференцирующей стехиографии. Основу составляли прецизионно измеренные на кристаллах в широком диапазоне данные о температуре, давлении, составе и пространственной химической однородности, связанные друг с другом. Выходная информация реализовывалась в количественные данные: о составе расплавов и газовой фазы, протяженности областей гомогенности, природе и причинах появления дефектов, а также о  $p$  и  $T$  параметрах, которые исключали нестехиометрию. Далее с помощью специальных методических разработок, полученный массив взаимно согласованных данных обеспечивал надежную трактовку этапов происходящего процесса кристаллизации, открывая тем прямой путь к направленному получению монокристаллов с необходимым сочетанием функциональных свойств. В качестве примера ниже приводятся  $p$ - $T$  диаграмма и переходы твердого  $\text{LiGaTe}_2$  в жидкое состояние и появление летучего компонента, а также общий вид выращенных кристаллов семейства  $\text{Li}(\text{In}, \text{Ga})(\text{SeTe})_2$ .



# СИНТЕЗ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (Mo, W, Co) ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Н.И. Мацкевич<sup>1</sup>, В.Н. Шлегель<sup>1</sup>, С.В. Станкус<sup>2</sup>, А.Н. Семерикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>ИТ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090

nata.matskevich@yandex.ru

Соединения на основе оксидов переходных элементов (Mo, W, Co) являются многофункциональными материалами, применяемыми в различных областях: экологически чистых технологиях, физике высоких энергий, оптоэлектронике и др. [1-2]. Для высокоэффективного использования необходимы широкомасштабные, в частности, термодинамические исследования соединений. Целью работы является синтез и систематические термодинамические исследования поликристаллических и монокристаллических материалов в системах  $\text{Li}_2(\text{Mo/W})\text{O}_4$ - $(\text{Na/Cs})_2\text{MoO}_4$ - $\text{MoO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$ - $\text{RE}_2\text{O}_3$ - $\text{Co-O}$  (RE – РЗЭ) методами калориметрии растворения, высокотемпературной реакционной калориметрии и дифференциально-сканирующей калориметрии.

С использованием методов калориметрии растворения и высокотемпературной реакционной калориметрии получены стандартные энтальпии образования, энтальпии решеток, энергии стабилизации для соединений в системах  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ - $\text{Li}_2\text{WO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ - $\text{Cs}_2\text{MoO}_4$ - $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ - $\text{Na}_2\text{WO}_4$ - $(\text{Mo/W})\text{O}_3$ . На основании полученных данных найдены корреляции между энтальпиями решетки, стандартными энтальпиями образования и структурными параметрами. Кроме того, найдены корреляции между энтальпиями решетки и длиной волны люминесценции. В частности, показано, что в системе  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ - $\text{Li}_2\text{WO}_4$  длина волны люминесценции увеличивается с увеличением энтальпии решетки. С использованием прогнозирующей термодинамики обоснована природа данных корреляций. На основе одного из уравнений Максвелла выведено соотношение, связывающее теплоемкость и объем кристаллической решетки. Приведено экспериментальное подтверждение выведенного соотношения. Методом дифференциально-сканирующей калориметрии измерены высокотемпературные теплоемкости для  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{WO}_4$ ,  $\text{Cs}_2\text{MoO}_4$  и других соединений в вышеуказанных системах.

Для соединений в системах  $\text{V}_2\text{O}_3$ - $\text{RE}_2\text{O}_3$ - $\text{Co-O}$  (RE = Nd, Ho, Yb и др. РЗЭ) методом калориметрии растворения определены стандартные энтальпии образования и рассчитаны энтальпии решеток с использованием цикла Борна-Габера. Показано, что для малых замещений энтальпии решеток увеличиваются с уменьшением радиусов РЗЭ. Определены высокотемпературные теплоемкости и параметры фазовых переходов соединений  $\text{V}_{1-2.5}\text{RE}_{1.5}\text{CoO}_x$ .

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования РФ и гранта РФФИ (проект №19-19-00095). Авторы благодарят проф. К. Грэвса (Университет Бирмингема), Д.В. Кочелакова за проведение структурных исследований, В.Д. Григорьеву, В.А. Трифонова - за выращивание кристаллов и Д.А. Самошкина – за измерение теплоемкости методом ДСК.*

1. Punn R., Feteira A.M., Sinclair D.C., Greaves C. // J. Amer. Chem. Soc. 2006. V. 128, № 48. P. 15386-15387.
2. Matskevich N.I., Shlegel V.N., Semerikova A.N., Samoshkin D.A., Grigorieva V.D., Stankus S.V., Kuznetsov V.A., Ponomareva S.A., Zaitsev V.P., Novikov A.Yu. // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 12130.

## **ГАЗОГИДРАТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАМКАХ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ СО РАН**

А.Ю. Манаков, Т.В. Родионова  
*ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090*  
manakov@niic.nsc.ru

Газовые гидраты это распространенные в природе соединения, в которых молекулы газов располагаются в полостях каркаса, построенного из связанных водородными связями молекул воды. В состав природных гидратов преимущественно входят углеводородные газы, углекислота и азот. По минимальным оценкам количество газа в природных газогидратах сравнимо с разведанными запасами газа в месторождениях традиционного типа. Необходимыми условиями существования скоплений природных гидратов является наличие свободных гидратообразующих газов и воды, умеренно высокое давление и пониженная температура. В природе необходимые для существования гидратов термобарические условия существуют в верхних частях осадочных слоев водоемов на глубинах более 200-300 м и в вечной мерзлоте. В газовой и нефтяной промышленности образование газовых гидратов в аппаратуре и трубопроводах является нежелательным явлением и может приводить к остановке добычи и аварийным ситуациям. Затраты на борьбу с гидратообразованием зачастую вносят значительный вклад в конечную цену получаемого продукта. Кроме того, в настоящее время разрабатываются технологии хранения и транспортировки природных газов в форме газового гидрата, технологии разделения газовых смесей при помощи гидратообразования и некоторые другие. В докладе будут сделан краткий обзор газогидратных исследований выполненных в рамках Интеграционных проектов Сибирского отделения РАН при активном участии и поддержке Ф.А. Кузнецова.

# ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЯЗЕЙ МЕТАЛЛ-ЛИГАНД В ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕКУРСОРАХ МОСVD КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИКИ И СВОЙСТВ

И.В. Мирзаева<sup>1</sup>, Р.Э. Афаунов<sup>1,2</sup>, С.Г. Козлова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090  
dairdre@gmail.com

Энергия связи металл-лиганд — важный параметр прекурсора МОСVD. Возможность быстро оценивать энергию связи по косвенным характеристикам позволит изменить подход к поиску новых прекурсоров. Вместо эмпирического перебора можно будет прогнозировать, как изменение лиганда или центрального металла повлияет на прочность связи и, следовательно, на температуру разложения, летучесть и чистоту осаждаемого материала. Такими характеристиками могут быть топологические параметры электронной плотности из квантовой теории атомов в молекулах (QTAIM – Quantum Theory of Atoms in Molecules) [1]. Известный пример — формула Эспинозы [2] для водородных связей и вандерваальсовых взаимодействий, связывающая плотность потенциальной энергии в связевой точке и энергию взаимодействия. В данной работе мы попытались найти подобные соотношения для нескольких типов связей металл-лиганд в содинениях, которые используются как прекурсоры МОСVD.

Для ряда  $\beta$ -дикетонатов меди найдено несколько корреляционных соотношений между энергией связей медь-лиганд и различными топологическими характеристиками соответствующих связевых критических точек [3]. Оказалось, что между характеристиками, отвечающими за делокализацию электронов, есть взаимосвязь [4], что позволяет выбирать, какую именно характеристику будет более удобно использовать в рамках каждой конкретной задачи.

Применение данных соотношений к  $\beta$ -дикетонатам палладия показывает более сложную картину. Можно определить одно подобное соотношение, но с другими коэффициентами для комплексов с фторированными лигандами и другое — для комплексов с нефторированными лигандами.

Также интересная картина наблюдается для комплексов свинца, для которых начинают играть роль релятивистские эффекты, такие как наличие стерически активной неподеленной пары. Для  $\beta$ -дикетонатов свинца возможны «первичные» и «вторичные» связи свинец-кислород. Для последних можно найти соотношение аналогичное формуле Эспинозы.

Расчёты выполнены методом теории функционала плотности в программных пакетах AMS [5] и ORCA [6]. Анализ полученных данных выполнялся в рамках фреймворка PySCF [7].

*Работа выполнена в рамках госзадания 125021302132-4*

1. Bader R. Atoms in Molecules: A Quantum Theory. 1994. USA: Oxford University Press.
2. Espinosa E., Molins E., Lecomte C. // Chem. Phys. Lett. 1998. V. 285. P. 170–173.
3. Afaunov R. E., Mirzaeva I.V., Kozlova S.G. // Rus. J. Coord. Chem. 2025. V. 51. P. 340.
4. Афаунов Р. Э., Мирзаева И. В., Козлова С. Г. // ЖСХ. 2024. Т.65, №10. С. 133021.
5. AMS, SCM, Theoretical Chemistry, Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands, <http://www.scm.com>
6. Neese F. // WIREs Comput. Mol. Sci. 2025. V. 15, № 2. P. e70019.
7. Sun Q., Zhang X. et.al. // J. Chem. Phys. 2020. V. 153, № 2. P. 1089.

# ТЕРМОДИНАМИКА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ $\beta$ -ДИКЕТОНАТОВ МЕТАЛЛОВ КАК ОСНОВА КОНТРОЛЯ ИХ ПАРООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССАХ МОСVD

А.М. Макаренко, К.В. Жерикова  
ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
alexmakarenko@niic.nsc.ru

Летучие  $\beta$ -дикетонаты металлов широко применяют в качестве предшественников МОСVD при получении различных функциональных материалов. Успешное осуществление газофазных процессов подразумевает наличие надёжных данных по давлению насыщенных паров, энтальпиям и энтропиям сублимации или испарения этих соединений, однако имеющиеся в литературе данные, как правило, имеют значительный разброс [1, 2]. В связи с этим мы разработали методику проверки термодинамических данных на достоверность на примере *трис*- $\beta$ -дикетонатов различных металлов [1-3], суть которой состоит в установлении зависимости между составом и соответствующими свойствами в рядах изолигандных хелатов. Условием её успешного применения является наличие надёжно определённых стандартизованных термодинамических данных ряда комплексов одного металла (базового ряда) и хотя бы одного соединения проверяемого ряда.

Следующим вектором развития методики является переход к  $\beta$ -дикетонатным комплексам металлов другой валентности. В этой работе мы акцентировали внимание на соединения меди(II), так как, с одной стороны, это наиболее обширный ряд комплексов с существующими литературными термодинамическими данными (более 20 соединений), с другой – они синтетически и экономически доступны, что делает их удобными объектами исследования. Кроме того, отдельный интерес представляет собой распространение методики на разнолигандные  $\beta$ -дикетонатные комплексы металлов. В качестве тестируемого ряда мы выбрали *бис*- $\beta$ -дикетонаты магния с тетраметилэтилендиамином [4-6].

В результате систематического исследования получен стандартизованный массив термодинамических характеристик комплексов меди(II) и магния(II), с помощью которого мы распространили методику на  $\beta$ -дикетонатные комплексы металлов(II), а также продемонстрировали возможность её применения на разнолигандные соединения.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 25-15-00328)*

1. Makarenko A.M., Zaitsau Dz.H. et al. // Coatings. 2023. V. 13, № 3. P. 535.
2. Makarenko A.M., Trubin S.V. et al. // Coatings. 2023. V. 13, № 8. P. 1458.
3. Zherikova K.V., Makarenko A.M. et al. // J. Therm. Anal. Calorim. 2022. V. 147. P. 14987.
4. Евсеев Г.С., Сухих А.С. и др. // ЖСХ. 2025. Т. 66, № 11. С. 1.
5. Vikulova E.S., Zherikova K.V. et al. // J. Therm. Anal. Calorim. 2019. V. 137. P. 923.
6. Викулова Е.С., Рихтер Э.А. и др. // ЖФХ. 2024. Т. 98, № 1. С. 45.

# ХИМИКО-КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ LAFOR ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ РОСТА ПЛЕНКИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

В.С. Полумских, А.А. Дудин, Г.А. Рудаков  
ИНМЭ РАН, ул. Ленинский проспект, д. 32А, г. Москва, 119334  
polomskikh@gmail.com

Атомно-слоевое осаждение (АСО) – технология, которая нашла свое широкое применение в различных областях микроэлектроники, позволяющая получать ультратонкие пленки материалов с уникальными физическим и электрофизическими свойствами [1-3]. Данный метод характеризуется высокой конформностью получаемых пленок и точным контролем их толщины в силу их малой скорости осаждения на каждом шаге процесса АСО. Управление скоростью осаждения возможно за счет применения прекурсоров с разной летучестью или оптимизацией параметров технологического процесса, обеспечивающих максимальную скорость роста пленки для используемого прекурсора. Однако несмотря на относительно широкий ряд доступных соединений в качестве прекурсоров, их выбор всё равно ограничен с одной стороны, а с другой стороны, для каждого прекурсора требуется подбор оптимальных параметров процесса. При этом оптимизация параметров процесса требует значительного времени. Наличие теоретических разработок, позволяющих прогнозировать толщину пленки в зависимости от параметров процесса, позволяет сократить время, затрачиваемое на оптимизацию.

Данная работа является развитием моделей, предложенных авторами ранее [4]. В рамках модели адсорбции Лэнгмюра и уравнений химической кинетики первого порядка, относительно концентраций адсорбированных реагентов, разработаны модели роста пленок в зависимости от значений технологических параметров. Была предложена химико-кинетическая модель АСО, в которой для каждого шага цикла представлены системы линейных дифференциальных уравнений. В общем случае решение уравнений для каждого шага зависит от начальных концентраций, полученных путем решения уравнений для предыдущего шага, поэтому можно получить ряды для концентраций прекурсора и реагента на каждом шаге. Разработана модель LAFOR (Langmuir Adsorption First Order Reactions), учитывающая концентрации реагентов на поверхности на каждом цикле АСО. Разработано программное обеспечение для поиска параметров модели LAFOR на основании экспериментальных данных АСО с последующей визуализации полученных данных.

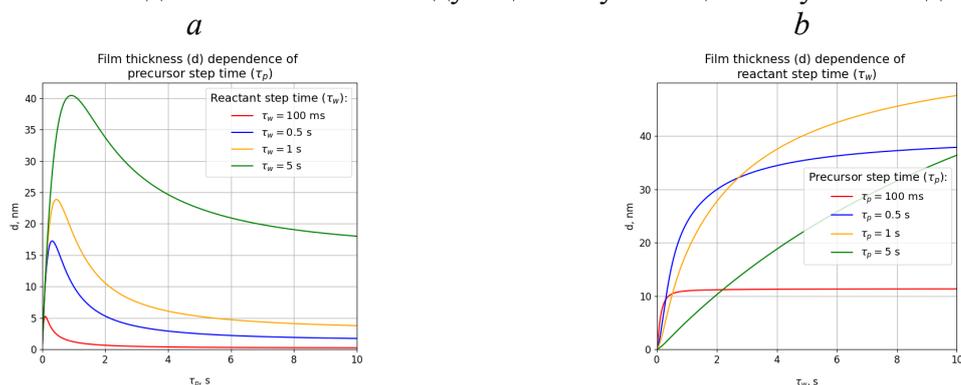


Рис. 1. Пример визуализации данных для случая ингибирования роста пленки прекурсором.

а – зависимость роста пленки от времени шага прекурсора.

б – зависимость роста пленки от времени шага реагента.

Работа выполнена в рамках госзадания №24-91-20001.

1. Pfeiffer, K., Dewald, W., & Szeghalmi, A. (2019). *Optics Letters*, 44(13), 3270.
2. Lin, L., Huang, H., Xu, K., et al (2025). *App. Surf. Sci.*, 681, 161504.
3. Hennessy, J., Rodríguez, R. E., West, W. C., & Brandon, E. J. (2023). *Science & Technology A*, 41(4).
4. Polomskikh, V. S., Dudin, A. A., & Rudakov, G. A. (2025). *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*, 725 (137452), 137452.

# ФАЗОВАЯ ТЕРМОДИНАМИКА МОСVD ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ НА ПРИМЕРЕ МЕДНЫХ КОМПЛЕКСОВ

К.В. Жерикова

ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
ksenia@niic.nsc.ru

Одними из наиболее динамично развивающихся направлений получения полифункциональных материалов являются газофазные процессы, среди которых химические, такие как осаждение из газовой фазы с использованием соединений металлов с органическими лигандами – МОСVD, становятся приоритетными при выборе способа нанесения на геометрически сложные подложки. МОСVD предъявляет особые требования к используемым прекурсорам: высокое давление паров (летучесть), воспроизводимый и стабильный массоперенос, термостойкость при транспортировке к подложке, инертность по отношению к материалу подложки и минимизация образования примесных фаз при разложении. Большая часть требований связана с температурно-зависимыми свойствами соединений и обусловлена тем, что парообразование и поведение в конденсированной и газовой фазах используемого в газофазных процессах металлсодержащего соединения (прекурсора) оказывают существенное влияние на толщину и микроструктуру, а следовательно, и функциональные свойства пленочных материалов. В совокупности с термическим поведением в конденсированной фазе (термическая устойчивость, фазовые переходы) эти данные определяют режим испарителя в реакторе МОСVD, позволяя прецизионно контролировать количество вещества, подаваемого в зону реакции при определенной температуре парообразования.

В докладе будет представлен оригинальный термодинамический подход диагностического и прогностического назначений, разрабатываемый нами с целью как оценки качества полученных и/или уже имеющихся термодинамических данных по фазовым переходам твердое тело – газ, жидкость – газ и твердое тело – жидкость, так и прогнозирования этих термодинамических свойств. Последнее актуально с точки зрения эффективного дизайна предшественников и в тех случаях, когда экспериментальные данные в силу физико-химических особенностей соединения получить невозможно. В основу подхода заложены различные корреляции «структура-свойство», обобщения и принципы групповой аддитивности, что подразумевает получение надежных термодинамических данных по как можно большему количеству соединений.

В рамках данного сообщения выбраны комплексы меди (I,II) с  $\beta$ -дикетонами ( $R_1C(O)CHR^2C(O)CR_2$ )<sub>2</sub> с различными заместителями ( $R_1, R_2, R^2$ ). Эта серия соединений, во-первых, позволяет сформировать обширную базу необходимых экспериментальных данных, а, во-вторых,  $\beta$ -дикетонаты меди активно используются в качестве предшественников в процессах МОСVD при получении материалов различного назначения. Среди активно развиваемых применений медьсодержащих агентов (наночастицами/кластерами) – это получение антибактериальных биосовместимых материалов сложных составов на поверхностях онкоимплантатов [1,2].

1. Sergeevichev D.S., Dorovskikh S.I., Vikulova E.S. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2024. 25. 1100.
2. Жерикова К.В., Трубин С.В., Пищур Д.П., Морозова Н.Б. // ЖФХ. 2024. 98. № 1. 59-64.

*Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 25-15-00328).*

## ФТОРИРОВАННЫЕ РАЗНОЛИГАНДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ КОБАЛЬТА(II) ДЛЯ ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ ФТОРИДНЫХ И ОКСИДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

С.И. Доровских<sup>1</sup>, В.А. Ятыгин<sup>1,2</sup>, А.С. Сухих<sup>1</sup>, А.М. Макаренко<sup>1</sup>, Д.П. Пищур<sup>1</sup>,  
С.В. Сысоев<sup>1</sup>, К.В. Жерикова<sup>1</sup>, Е.С. Викулова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090

reter16@yandex.ru

Наноматериалы  $\text{CoF}_2$  востребованы в качестве катодных материалов и суперконденсаторов. Пленки  $\text{Co}_3\text{O}_4$  с низкими величинами сопротивления и высокой подвижностью заряда могут рассматриваться как полупроводящие слои для электронных устройств, таких как микроканальные пластины, резисторы и пр. [1]. Одним из эффективных методов их получения является химическое осаждение из газовой фазы (MOCVD) и его модификации. Состав, строение и физико-химические свойства получаемого в процессах MOCVD материала зависят, в том числе от исходного летучего соединения, что побуждает исследователей к развитию химии летучих прекурсоров переходных металлов.

Наиболее востребованы в MOCVD комплексы металлов с  $\beta$ -дикетонами ( $\text{L} = \text{RC}(\text{O})\text{CHC}(\text{O})\text{R}'^-$ , анион  $\beta$ -дикетона). Однако для кобальта(II) типична координационная ненасыщенность металлоцентра, что приводит к формированию олигомерных прекурсоров и непостоянству состава их газовой фазы. Проблема олигомеризации может быть решена введением объёмных групп в L (например,  $\text{R} = \text{R}' = \text{tBu}$ ), дополнением координационной сферы металла нейтральными лигандами, изменением степени окисления металла. В последнее десятилетие возрастает интерес к разнолигандным комплексам кобальта с фторированным  $\beta$ -дикетонами и нейтральными лигандами [2-3]. Введение хотя бы одной  $\text{CF}_3$ -группы в  $\beta$ -дикетонатные лиганды приводит к значительному изменению летучести соответствующих комплексов. Среди нейтральных лигандов наиболее востребованными оказались алифатические диамины, в частности tmeda –  $\text{N,N,N}',\text{N}'$ -тетраметилэтилендиамин [4].

В настоящей работе продолжено развитие химии разнолигандных комплексов кобальта(II) с tmeda и фторированным  $\beta$ -дикетонами ( $\text{RC}(\text{O})\text{CHC}(\text{O})\text{R}'$ ), в качестве базового комплекса получен  $\text{Co}(\text{tmeda})(\text{hfac})_2$  ( $\text{R} = \text{R}' = \text{CF}_3$  (hfac)) Синтезированы и впервые охарактеризованы методом комплексы с увеличенными перфтоалкильными заместителями ( $\text{R} = \text{CH}_3$ ,  $\text{R}' = \text{C}_2\text{F}_5$  (pfac),  $\text{R} = \text{CH}_3$ ,  $\text{R}' = \text{C}_3\text{F}_7$  (hfac),  $\text{R} = \text{CF}_3$ ,  $\text{R}' = \text{C}_2\text{F}_5$  (ofpac)). Определены кристаллические структуры комплекса:  $\text{Co}(\text{tmeda})(\text{pfac})_2$ ,  $\text{Co}(\text{tmeda})(\text{ofpac})_2$ . Методом ДСК впервые исследованы фазовые превращения при нагревании до плавления и определены термодинамические величины процесса плавления для вышеперечисленных комплексов. Проведено термодинамическое моделирование состава пленок в системе  $\text{Co}(\text{tmeda})(\text{hfac})_2\text{-O}_2$  в зависимости от температуры и давления и найдены условия формирования фаз  $\text{CoF}_2$  и  $\text{Co}_3\text{O}_4$ . Тестовые MOCVD эксперименты привели к получению пленок  $\text{CoF}_2$  и  $\text{Co}_3\text{O}_4$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 24-79-10272.*

1. Miquelot A., Despotopoulou A. et al. // Mater. Chem. Phys. 2020. V. 240. P. 122059.
2. Junge Puring K., Zywitzki D. et al. // Inorg. Chem. 2018. V. 57, № 9. P. 5133-5144.
3. Доровских С.И., Стабников П.А. и др. // ЖОХ 2021. Т. 91, № 6. С.1957-1962.
4. Gurley L., Beloukhina N. et al. // J. Inorg. Bioche. 2011. V. 105, № 6. P. 858-866.

## ГЕТЕРОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ БЕТА-ДИКЕТОНАТЫ КАК ПРЕКУРСОРЫ ДЛЯ МОСVD МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПЛЁНОК

В.В. Крисюк

*ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090*

*kvv@niic.nsc.ru*

Исследование летучих гетерометаллических прекурсоров для МОСVD приложений остается привлекательной, но малоизученной тематикой. Использование гетерометаллических прекурсоров известно, например, в золь-гель методах получения компактных образцов. Получение многокомпонентных материалов методом МОСVD из гетерометаллических прекурсоров сдерживается их небольшим количеством, поскольку получение комплексов, содержащих даже два металла является серьезной химической задачей. При рациональном выборе лигандов возможно получение летучих гетеробиметаллических комплексов на основе бета-дикетонатов металлов. Подобные лиганды прекрасно зарекомендовали себя для получения монометалльных прекурсоров. Рассмотрена связь состава и строения гетерометаллических бета-дикетонатов и их производных с летучестью и термической устойчивостью, являющимися определяющими свойствами МОСVD прекурсоров.

В работе рассматривается использование гетерометаллических бета-дикетонатов для химического осаждения пленок различного состава и назначения. Наибольшее применение они получили для получения прекурсоров оксидных пленок [1].

На примере ряда прекурсоров типа  $[TM(acacen)Li(dpm)]$ , где  $TM = Co, Ni, Mn$  [2] впервые продемонстрирована возможность применения гетерокомплексов как МОСVD прекурсоров для получения слоев кобальтата лития (LCO) – одного из ключевых катодных материалов литиевых микробатарей. Проведено исследование возможности получения пленок двойных оксидов, содержащих литий,  $LiCoO_2$ ,  $LiNiO_2$ ,  $LiCo_xNi_yMn_zO_2$ . Исследована возможность получения тройных оксидов из смеси гетеробиметаллических прекурсоров. Были получены также Na-содержащие аналоги с теми же лигандами [3]. Полученные результаты показывают принципиальную возможность получения тонкопленочных катодных материалов из гетерометаллических прекурсоров методом химического осаждения из газовой фазы и целесообразность проведения дальнейших исследований в данном направлении.

Ряд цирконий-содержащих Pb-Zr, La-Zr дикетонатов был использован для осаждения поликристаллических пленок  $La_2Zr_2O_7$  – перспективного термобарьерного материала.

Показано, что из летучих Cu-Pd и Cu-Pt гетерокомплексов на основе метокси-замещенных дикетонатов можно получать пленки биметаллических сплавов различного состава [4].

1. L.G. Hubert-Pfalzgraf, *Inorg, Chem. Comm.* 6 (2003) 102–120.
2. V.V. Krisyuk, A.S. Sukhikh, S. Urkasym kyzy, N.A. Kryuchkova, A.E. Turgambaeva, *Polyhedron* 261 (2024) 117139.
3. T.S. Sukhikh, S. Urkasym kyzy, I.V. Korolkov, V.V. Krisyuk, *Journal of Molecular Structure*, 1355 (2026) 145058.
4. V.V. Krisyuk, A.E. Turgambaeva, I.V. Mirzaeva, S. Urkasym kyzy, T.P. Koretskaya, S.V. Trubin, S.V. Sysoev, Y.V. Shubin, E.A. Maksimovskiy, N.I. Petrova, *Vacuum* 166 (2019) 248–254.

## СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕТУЧИХ БЕТА-ДИКЕТОНАТОВ НИОБИЯ

С. Уркасым кызы, А.Е. Тургамбаева, А.С. Сухих,  
С.В. Сысоев, И.К. Игуменов, В.В. Крисюк  
ИHX CO РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
urkasymkyzy@niic.nsc.ru

Тонкие пленки, содержащие оксиды ниобия, нашли применение в качестве конденсаторов, изоляторов, катализаторов, датчиков газов, солнечных элементов, электрохромных веществ [1]. В качестве CVD прекурсоров известны алкоксиды, алкиламиды и хлорид ниобия [2]. Однако эти прекурсоры имеют ряд ограничений, не устойчивы на воздухе, являются вязкими жидкостями, имеют низкую термическую стабильность при испарении, получают загрязнённые галогенами пленки. Для улучшения термической стабильности алкоксидов ниобия вводили хелатные лиганды, в частности, бета-дикетонаты [3]. Синтезирован ряд гомолигандных бета-дикетонатных комплексов ниобия(IV) [4], однако, они не были исследованы как прекурсоры для осаждения пленок.

В настоящей работе получены комплексы ниобия(IV) и ниобия(V) с бета-дикетонатами *dpm* и *ptac* (*dpm*=дипивалоилметанат, *ptac*=пивалоилтрифторацетонат). Модифицирована методика синтеза бета-дикетонатов из NbI<sub>4</sub>, а также предложена новая методика синтеза бета-дикетонатов ниобия(IV). Впервые выделен и охарактеризован летучий комплекс O[NbO(*dpm*)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>. Определена кристаллическая структура полученных комплексов. Полученные комплексы устойчивы на воздухе и их можно пересублимировать в вакууме при температурах 160-170 °С (10<sup>-3</sup> Торр). Термические свойства этих соединений были охарактеризованы различными методами, включая ТГ-ДТА, масс-спектрометрическое исследование состава газовой фазы при нагревании, тензиметрические измерения плотности пара.

Масс-спектрометрическое исследование состава газовой фазы при нагревании паров Nb(*dpm*)<sub>4</sub> со скоростью 5 град/мин в реакторе при пониженном давлении показало, что разложение паров в присутствии аргона начинается при температуре 375±10 °С и сопровождается выделением протонированного лиганда H*dpm*. Максимальная степень разложения достигается при температуре >400 °С.

Полученные данные о термических свойствах указывают на возможность использования синтезированных соединений в качестве прекурсоров для получения ниобий-содержащих оксидных пленок.

- [1] J. M. Hwang et al. // Polyhedron. 2021. 200. P.115134.
- [2] N. Elliott et al. // J. Mater. Chem. 2003. 13. P. 2952–2956.
- [3] S. Lim et al. // Chem. Mater. 2002. 14. P.1548-1554.
- [4] М.В. Кандыбин и др. Журн. общей хим. 1999. Т.69. №6. С.902-911.

# СОВРЕМЕННАЯ ХИМИЯ ЛЕТУЧИХ КОМПЛЕКСОВ ЦИРКОНИЯ И ГАФНИЯ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ОКСИДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Е.С. Викулова<sup>1</sup>, С.И. Доровских<sup>1</sup>, Н.Б. Морозова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
lazorevka@mail.ru

Пленочные наноматериалы на основе диоксидов циркония и гафния, получаемые методами атомно-слоевого (ALD) или химического газофазного (MOCVD) осаждения, находят широкое применение в различных областях – от микроэлектроники до биомедицины. Ряд процессов уже успешно коммерциализирован, например, при производстве схем памяти и логических схем с проектными нормами 45 нм и ниже ( $\text{HfO}_2$  – подзатворный диэлектрик), что закрепило использование определенных летучих металл-органических соединений. Тем не менее, во многих областях, например, при разработке устройств на основе резистивных или сегнетоэлектрических пленок, оптимальные прекурсоры ещё не предложены, что стимулирует развитие химии летучих соединений циркония и гафния. С целью рационализации общей стратегии развития и отдельных её аспектов, а также выявления преимуществ и недостатков определенных классов прекурсоров, в данной работе мы приводим обзор литературы по данной области за последние 10 лет, дополненный оригинальными наработками в направлении синтеза и исследования высокочистых летучих соединений.

В частности, в последнем тематического обзоре (2014 г), в качестве основной стратегии прогнозировалось получение гетеролептических прекурсоров, в особенности, комбинирующих 2-3 типа лигандов для «тонкой настройки» термических свойств и реакционной способности [1]. Однако на практике основной фокус развития химии был направлен на увеличение термической стабильности соединений, для чего проводили направленную модификацию классических прекурсоров «второго поколения» (циклопентадиенил-алкиламидных производных) или подбор новых анионных лигандов (предпочтительно, хелатирующих). Важным аспектом исследований стало расширение представлений о поверхностной химии с помощью методов квантовой химии, но экспериментальная верификация таких результатов остается весьма ограниченной.

Важной областью, на наш взгляд, является изучение термохимических свойств прекурсоров. Так, в 2022 г экспериментально показано, что в результате длительной (7 дней) выдержки относительно стабильного циклопентадиенил-алкиламидного соединения циркония наблюдается его небольшое разложение, более выраженное при более высоких температурах испарительного контейнера ( $> 120^\circ\text{C}$ ), что приводит к заметному изменению состава и толщины получаемых покрытий и, соответственно, функциональных характеристик систем на их основе [2]. Такое изменение может быть нелинейным. Поэтому для аттестации прекурсоров рекомендовано комплексное исследование, включающее изотермическую выдержку при различных температурах и получение количественных данных о термохимических свойствах (летучесть, стабильность в конденсированной и газовой фазах) [3]. Это позволяет направленно оптимизировать условия парообразования и осаждения в газофазных процессах.

*Авторы благодарят Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Работа выполнена в рамках государственного задания 125040404830-7.*

1. T. Blanquart, J. Niinistö, M. Ritala, M. Leskelä. // Chem. Vapor Depos. 2014. V. 20, No. 7-8-9. P. 189-208.
2. E. Choi, H. Kim, S. Maeng et al. // Mater. Today Comm. 2022. No. 32. Art. No. 104008.
3. E.S. Vikulova, L.N. Zelenina, A. E. Turgambaeva, et al. // Russ. Chem. Bull. 2024. V. 74, No. 6. P. 1864-1870.

## АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ И СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПЛЕНОК РУТЕНИЯ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В ПЛАНАРНОМ И 3D ВАРИАНТЕ

К.В. Руденко, А.В. Мяконьких, А.Е. Рогожин  
НИИЦ «Курчатовский институт», ОФТИ им. К.А. Валиева,  
Нахимовский просп. 36 корп.1, Москва, 117218  
rudenko@ftian.ru

Перспективы применения металлического рутения в приборных структурах нанoeлектроники (ИС с нормами проектирования N10 ÷ N5 нм) обусловлены его уникальным сочетанием физических свойств, в частности, низким электросопротивлением в ультратонких пленках [1], обусловленным малой длиной пробега электронов, и отсутствием барьерных материалов для линий межсоединений [1,2]. Несмотря на то, что интерес к процессам химического осаждения из газовой фазы (CVD) рутения появился достаточно давно [3], при росте аспектных отношений (AR) в приборных наноструктурах, как в системах металлизации современных процессорных УБИС, так и в каналах (word lines) кристаллов флеш-памяти 3D-NAND, методы атомно-слоевого осаждения рутения становятся особенно актуальными. Например, в ближайшей перспективе потребуется заполнение металлом каналов с апертурой до 60 нм и глубиной до 10 мкм в диэлектрике многослойных NAND чипов [4].

Известно, что металлоорганические прекурсоры рутения, аналогично другим металлам платиновой группы, имеют плохую хемосорбцию к поверхности кремния, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, имеющей как гидрофильную (терминальные группы –OH) так и гидрофобную (группы –CF<sub>x</sub>, –CH<sub>3</sub>) поверхности, что приводит к большому количеству латентных ALD циклов, делающих технологию ультратонких пленок Ru недостаточно воспроизводимой. В работе исследован процесс PEALD рутения с использованием I прекурсора Ru(EtCp)<sub>2</sub> и плазмы O<sub>2</sub>, как II прекурсора. Предложен метод модификации поверхности кремния и диэлектриков, включая современные органосиликатные стекла OSG в системах металлизации УБИС, позволяющий преодолеть проблему латентных циклов. При этом механизм спонтанного островкового роста на дефектных участках поверхности меняется на по-монослойное осаждение. Определено температурное окно процесса. Обсуждаются возможности селективного процесса AS-ALD рутения на участки с модифицированной поверхностью. Предложен процесс формирования Ru-нанопроводов анизотропным травлением в кислородной плазме низкого давления.

Теоретически [5] и экспериментально изучен процесс PEALD рутения в 3D-структуры тренчей и отверстий в кремнии. Кремниевые 3D-структуры формировались при помощи криогенного глубокого плазменного травления [6], потенциально позволяющего достичь рекордных значений AR при наноразмерных апертурах [7]. Дальнейший прогресс в работе связывается с исследованием ALD рутения в структуры с высоким AR, сформированные криопроецессами плазменного травления.

*Формирование кремниевых 3D структур выполнено за счет средств гранта РФФ № 24-69-00039, <https://rscf.ru/project/24-69-00039/>*

1. M.H. van der Veen, et al. // Proc. 2018 IEEE IIT Conference, P. 172.
2. J. Kim, H. Rhee, et al. // ACS Appl. Electron. Mater. 2023. V. 5, Iss. 5, P. 2447.
3. В.Ю. Васильев. // Микроэлектроника. 2010. Т. 39, №4, С. 284.
4. Press Release of LAM Research Jul 31, 2024 // [https://investor.lamresearch.com/2024-07-31-Lam-Research-Introduces-....Scaling-of-3D-NAND-for-the-AI-Era#assets\\_all](https://investor.lamresearch.com/2024-07-31-Lam-Research-Introduces-....Scaling-of-3D-NAND-for-the-AI-Era#assets_all)
5. A.V. Fadeev, K.V. Rudenko. // Thin Solid Films. 2019. V. 672, P. 83.
6. K. Rudenko, A. Miakonkikh, et al. // Russ. Microelectronics. 2025. V. 54, Iss. 8. *in press*.
7. J. Parasuraman, A. Sumanwar, et al. // Microelectron. Engineering. 2014. V. 113, P. 35

# СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДОВ ВАНАДИЯ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННО-СТИМУЛИРОВАННОГО ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

Волошин Б.В.<sup>1</sup>, Селезнев В.А.<sup>1</sup>, Голяшов В.А.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИФП СО РАН, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13, 630090  
voloshinbogdann@gmail.com

Ванадий образует большое количество оксидных фаз, таких как VO, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, VO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, а также промежуточные оксиды с общими формулами V<sub>n</sub>O<sub>2n-1</sub> и V<sub>2</sub>O<sub>2n+1</sub>. Обилие физико-химических свойств этих оксидов позволяет применять их для создания таких устройств как инфракрасные детекторы, транзисторы, термохромные покрытия, суперконденсаторы, натрий-ионные аккумуляторы и др. Перечисленные приложения требуют использования тонкопленочных покрытий, которые можно получить методом химического осаждения из газовой фазы, а также его разновидностью - атомно-слоевым осаждением. В данной работе исследовано осаждение оксидов ванадия в реакции тетракис-(этилметиламино)ванадия (ТЕМАВ) с кислородом различных концентраций с использованием плазмы инертных газов. Определено влияние температуры и плазменной обработки на состав осаждаемых пленок.

Осаждение оксидов ванадия проводили по схеме, изображенной на рисунке 1. На первом этапе происходит подача ТЕМАВ, на втором – продувка реактора, на третьем – подача кислорода, на четвертом – обработка плазмой, на пятом – продувка реактора.

Мы провели серию экспериментов с варьированием концентрации кислорода на этапе 3. Установлено, что при концентрации кислорода от 1 до 2% образуется аморфный диоксид ванадия, в то время как при более высоких концентрациях образуется аморфная смесь оксидов VO<sub>2</sub> и V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Дополнительные эксперименты по синтезу пленок оксидов ванадия с плазмой Ar, N<sub>2</sub> и He без этапа 3 подачи кислорода (рис.1) показали, что бомбардировка ионами плазмы способствует десорбции кислорода с поверхности формируемого оксида. На рис. 2 приведены спектры РФЭС синтезированных пленок оксидов ванадия. Видно, что в плазме аргона образовался наиболее восстановленный оксид. Это согласуется с предложенной гипотезой, что ионы более тяжелых газов будут способствовать более эффективной десорбции кислорода с поверхности оксида.

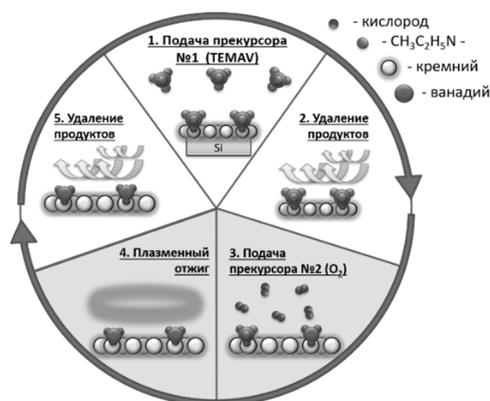


Рис. 1. Схема осаждения оксидов ванадия

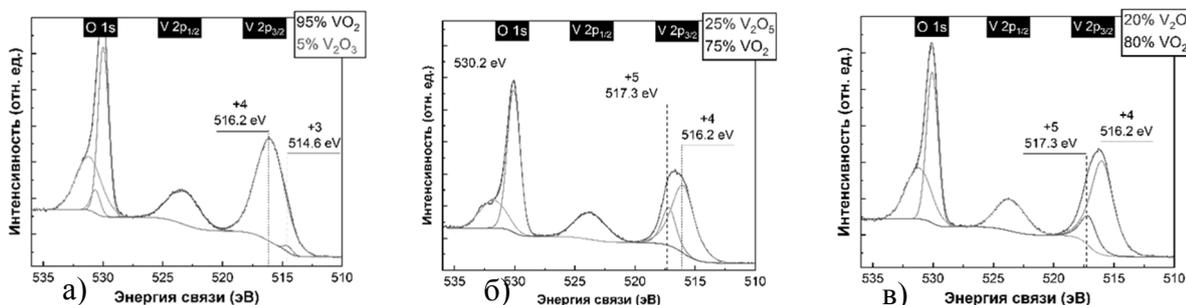


Рис. 2. Спектры РФЭС пленок оксидов ванадия, полученных с использованием плазмы аргона (а), азота (б), гелия (в)

*Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ.*

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ СЛОЕВ InP

А.С. Гудовских<sup>1,2</sup>, А.В. Уваров<sup>1</sup>, А.И. Баранов<sup>1</sup>,  
Е.А. Вячеславова<sup>1</sup>, А.А. Максимова<sup>1,2</sup>, Э.Я. Ярчук<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, ул. Хлопина, 3, Санкт-Петербург, 194021  
<sup>2</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ул. Проф. Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376  
gudovskikh@spbau.ru

Фосфид индия (InP) представляет большой интерес для применения в солнечной энергетике. Это прямозонный материал, обладающий необходимыми фотоэлектрическими свойствами (высокими значениями времен жизни неосновных носителей заряда) с оптимальным для создания однопереходных солнечных элементов значением ширины запрещенной зоны (1.35 эВ). Основным фактором, сдерживающим применение этого материала, является высокая стоимость подложек, позволяющих проводить эпитаксиальный рост. С другой стороны, были достигнуты перспективные для солнечной энергетике результаты по росту микрокристаллических слоев InP, обладающие достаточно высокими значениями времени жизни носителей заряда [1,2]. Однако используемые технологические подходы к формированию слоев требуют сравнительно высоких температур (>500°C) и не позволяют варьировать состав слоев для управления шириной запрещенной зоны.

В работе представлены результаты по разработке плазмохимической технологии роста слоев InP на подложках Si и кварца. Сравняются два подхода: непрерывный режим плазмохимического осаждения и послойный рост, комбинирующий подходы плазмохимического и атомно-слоевого осаждения. Рост обеспечивался в стандартной установке ПХО (Oxford Plasmalab System 100 PECVD) с использованием плазмы ВЧ (13,56 МГц) разряда при температурах 250-380°C. В качестве источников индия и фосфора использовался триметилиндий (ТМИ) и фосфин (PH<sub>3</sub>), соответственно.

Структурные свойства слоев InP зависят от температуры осаждения. Слои InP, выращенные на подложке Si с ориентацией (100), при температуре 350-380°C имеют микрокристаллическую структуру с преимущественной ориентацией (111) с размером нанокристаллитов 20-30 нм. Для этих слоев на спектрах комбинационного рассеяния четко различимы пики LO на 347 см<sup>-1</sup>, и TO на 303.7 см<sup>-1</sup>. С уменьшением температуры роста до 300°C наблюдается ухудшение структурных свойств, интенсивность пиков LO и TO на спектрах комбинационного рассеяния существенно уменьшается, а для слоев InP, выращенных при 250°C, пики не прослеживаются, что свидетельствует об аморфной структуре слоев.

Слои InP, выращенные на полуизолирующих подложках InP, согласно измерениям с помощью эффекта Холла, имеют n-тип проводимости с концентрацией электронов 1-2×10<sup>17</sup> см<sup>-3</sup> и подвижностью 1500-1700 см<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>. Высокое значение фотопроводимости слоев микрокристаллического InP, осажденных на кварцевую подложку, свидетельствует о перспективности применения данных слоев в фотоэлектрических преобразователях солнечного излучения.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 24-19-000150).*

1. Kapadia, R., Yu, Z., Wang, H.H. et al. // Sci. Rep. 2013, 3, 2275
2. W. Metaferia, Y.-T. Sun, et al. // J. Appl. Phys. 2014 116, 033519

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ РЕАКЦИЙ В ПРОЦЕССАХ МН $M\text{Cr}_x\text{O}_y$ ( $M = \text{Zn}, \text{Al}, \text{Ti}$ )

С.Г. Гаджимурадов<sup>1,3</sup>, С.И. Сулейманов<sup>2</sup>, И.М. Абдулагатов<sup>1,3</sup>, А.И. Абдулагатов<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Дагестанский государственный университет, ул. М. Гаджиева, 43а, Махачкала, 367000, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, Махачкала, 367025 Россия

<sup>3</sup>Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики — филиал Объединенного института высоких температур РАН, просп. Имама Шамиля, 39А, Махачкала, 367025 Россия  
gadjimuradov.sadr1@gmail.com

Смешанные оксидные плёнки  $M\text{Cr}_x\text{O}_y$  интересны как функциональные покрытия с сенсорными и каталитическими свойствами, как защитные пленки с хорошей механической стойкостью и термостабильностью. В данной работе исследуется химия поверхности в процессе осаждения  $M\text{Cr}_x\text{O}_y$  (где  $M - \text{Zn}, \text{Al}, \text{Ti}$ ). В качестве предшественников металлов использовали диэтилцинк ( $\text{Zn}(\text{Et})_2$ ), триметилалюминий ( $\text{Al}(\text{Me})_3$ ), тетрахлорид титана ( $\text{TiCl}_4$ ) и хромилхлорид ( $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$ ).

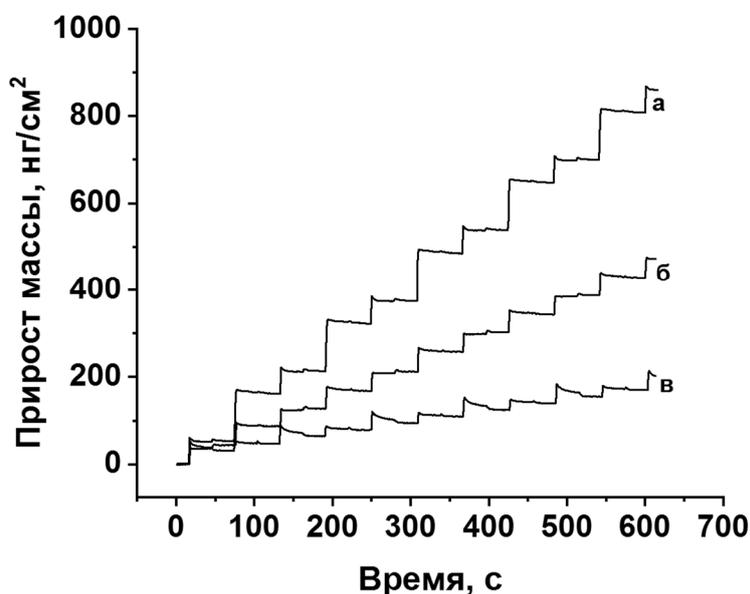


Рис. 1. Данные КИМ для процессов  $M\text{Cr}_x\text{O}_y$ , ( $M - \text{Zn}, \text{Al}, \text{Ti}$ )

На КИМ данных из рис.1, видно, что процессы воспроизводимый. Средний прирост за 5 суперциклов в процессе с DEZ (а) прирост составил  $162 \text{ нг/см}^2$ , с TMA (б) составил  $86 \text{ нг/см}^2$ , а с  $\text{TiCl}_4$  (в) прирост составил  $34 \text{ нг/см}^2$ .

В данной работе изучено влияние соотношения субциклов и сореагента в процессах осаждения хромсодержащих смешанных оксидных пленок с использованием данных КИМ, РФЭС, XRR и моделирования.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и Высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FZNZ-2025-0003).*

1. Drozd V.E., Tulub A.A., Aleskovski V.B., Korol'kov D.V. Appl. Surf. Sci. 1994. 82 /83. 587-590.
2. Ezhovskii Yu.K., Kirilova M.A. Inorganic Materials. 2007. 43, №. 12. 1464-1468

## ДИНАМИКА СУБЛИМАЦИИ МИКРОЧАСТИЦ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ГАЗА НА ПРИМЕРЕ $Zr(DPM)_4$

В.В. Лукашов<sup>1</sup>, И.К. Игуменов<sup>2</sup>, Р.А. Шутилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИТ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
luka@itp.nsc.ru

При МО CVD-осаждении функциональных покрытий с использованием бета-дикетонатов металлов ключевым фактором, ограничивающим скорость сублимации, являются термические свойства прекурсора. В частности, низкое давление насыщенного пара и недостаточная термическая стабильность соединений не позволяют достичь в зоне осаждения необходимой концентрации паров. В результате становится невозможным формирование покрытий требуемой толщины с высокой скоростью. Аппараты с закрученным кипящим слоем применяются для интенсификации процессов тепло- и массообмена. Эффект достигается за счёт тангенциального подвода газа, который создаёт вихревую структуру потока. Подобные установки востребованы в процессах сушки, испарения, охлаждения, а также в реакторах с твёрдой фазой и адсорбционных системах [1]. Преимущества такого подхода может быть использовано и для реализации сублимации. Однако важно учитывать, что выбор геометрии (радиус, угол конусности, конструкция внутренних завихрителей) и свойств частиц критически влияет на оптимальность режима и энергозатраты. Наши исследования показали, что неподвижно установленная модельная частица прекурсора с характерным размером  $d=3$  мм приходила в тепловое равновесие с нагретым до 250С потоком газа за время не превышающее 30 с при атмосферном давлении. Скорость ламинарного потока газа устанавливалась  $U=3... 5$  м/с. Время перехода в газовую фазу составляло существенного зависит от выбора рода газа. При использовании гелия скорость сублимации возрастает в несколько раз. Оценки псевдооживления по Тодесу [2] показывают, что по сравнению с аргоном, применение гелия приведёт к увеличению объёмного расхода, необходимого для реализации закрученного двухфазного потока в ограниченном объёме вихревой камеры не более чем на 25%. Полученные в работе аналитические оценки времени перехода вещества прекурсора в газовую фазу учитывают как влияние скорости фильтрации газа через вихревой сублиматор, так величину скорости обтекания отдельной частицы потоком газа.

1. Tawfik M., Diab M., Abdelmotalib H. Inter. J. Thermal Sci., 2020. 147, 106134.

2. Аэров М. Э., Тодес О. М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Изд-во «Химия», 1968

## ОСАЖДЕНИЕ ФТОРПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ HW CVD ПРИ РАЗБАВЛЕНИИ ГАЗА-ПРЕДШЕСТВЕННИКА ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ

А.В. Петрова, А.И. Сафонов

ИТ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090

safonov@itp.nsc.ru

Метод осаждения фторполимерных покрытий из газовой фазы, активированной горячим проволоочным катализатором – Hot Wire Chemical Vapor Deposition (HW CVD) – является одним из перспективных. Это обусловлено простотой его применения и широкими возможностями управления строением покрытий изменением параметров в процессе осаждения [1]. Основная идея метода HW CVD состоит в том, что разреженный поток газа-предшественника активируется на поверхности активатора, представляющего из себя разогретую до нескольких сотен градусов Цельсия каталитическую нить. Далее образовавшиеся радикалы и компоненты движутся к поверхности осаждения, где радикалы полимеризуются, формируя фторполимерное покрытие. В процессе движения радикалы могут деактивироваться, образуя тетрафторэтилен, который практически не участвует в реакции полимеризации. Описанная выше простая модель даёт представление о процессах, происходящих при осаждении фторполимерных покрытий из газовой фазы, ключевым параметром в которой является количество радикала дифторкарбена ( $:\text{CF}_2$ ). Известно, что количество радикалов, достигающих поверхности в процессе формирования покрытия, существенно влияет на его строение, в частности, при его синтезе газозафазными методами [2]. Таким образом, контролируя количество этого радикала, возможно управлять строением получаемого фторполимерного покрытия.

В работе изучалась возможность разбавления активированного газа-предшественника инертным газом (аргоном, гелием) с целью оптимизации процесса осаждения. Авторами было показано, что при определённых параметрах возможно увеличить количество радикалов при меньшем расходе газа-предшественника [3], однако при этом формируются покрытия с порошкообразным строением и низкой адгезией. Показана возможность применения данного подхода для управления строением и свойствами формирующегося покрытия. Проведённые исследования показали возможность не только увеличить эффективность осаждения покрытия, но и определить ещё один параметр, позволяющий существенно изменять строение и свойства осаждаемых фторполимерных покрытий.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№1023032400205-8-2.5.1)*

1. Yasuda H., Yeh Y., Fusselman S. Pure & Appl. Chem. 1990. 62, № 9. 1689.
2. Safonov A.I., Sulyaeva V.S. et al. Thin Solid Films. 2018. 653. 165.
3. Сафонов А.И., Суляева В.С. и др. ПМТФ. 2018. 59, № 5. 87.

# ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК $Al_2O_3$ МЕТОДОМ CVD С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗОПРОПИЛАТА АЛЮМИНИЯ

А.С. Митулинский, А.В. Гайдайчук, С.П. Зенкин, С.А. Линник  
НИ ТПУ, просп. Ленина, 30, Томск, 634050  
mitulinsky@tpu.ru

Функциональные покрытия на основе оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) представляют собой многозадачный технологический инструмент, который применяется в самых разных областях от защитных и коррозионностойких слоёв до термобарьерных и диэлектрических систем. Традиционные процессы получения  $Al_2O_3$ -покрытий обычно основаны на использовании высокорекреационноспособных прекурсоров, нередко токсичных и пирофорных, что усложняет технологию и повышает требования к безопасности. В связи с этим растёт интерес к методам, использующим более безопасные исходные соединения.

В работе представлены результаты синтеза покрытий  $Al_2O_3$  методом химического газофазного осаждения с применением изопропилата алюминия ( $Al(OC_3H_7)_3$ ) и кинетики кристаллизации покрытий при термическом отжиге до  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ .

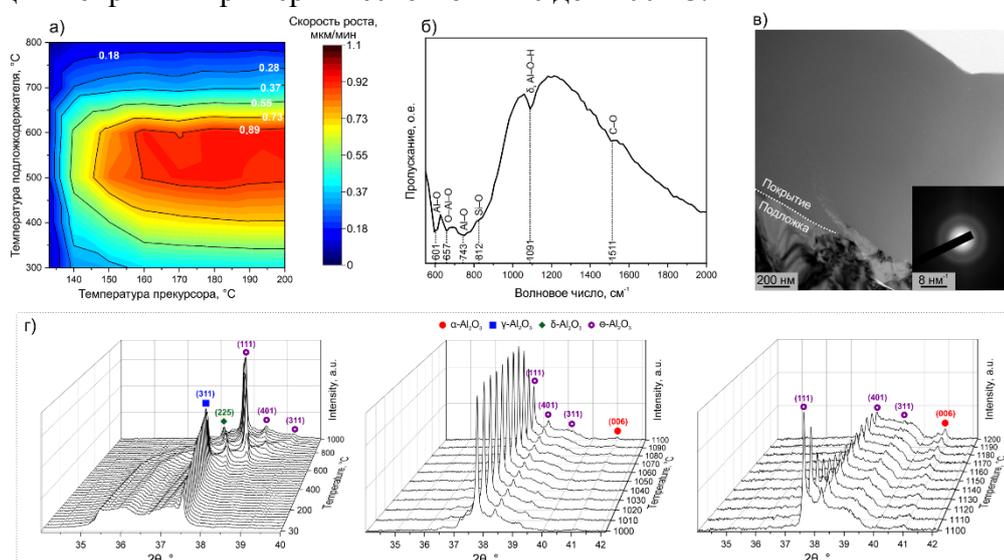


Рис. 1. Карта скорости роста покрытий (а); ИК-спектр пропускания покрытий (б); ПЭМ-изображение покрытия и микроэлектронграмма (во вставке) (в); карта рентгенограмм при нагреве (г)

Были выявлены оптимальные температурные параметры нагрева прекурсора и подложки, обеспечивающие высокую скорость роста плёнок – до  $0,94\text{ мкм/мин}$ . ИК-спектроскопия показала полосы, характерные для валентных колебаний  $Al-O$  ( $601$  и  $743\text{ см}^{-1}$ ) и деформационных  $O-Al-O$  ( $657\text{ см}^{-1}$ ). Рентгенофазовый анализ при нагреве от  $30$  до  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  показал последовательную фазовую эволюцию  $Al_2O_3$ : от слабых признаков  $\gamma$ -фазы ( $2\theta = 37,5^\circ$ ) к появлению  $\delta$ - и  $\theta$ -модификаций при  $500$ – $600\text{ }^\circ\text{C}$ , их дальнейшему преобразованию до  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  и формированию рефлекса  $\alpha$ -фазы ( $2\theta = 41,08^\circ$ ) при более высоких температурах.

Таким образом, представленный метод показал эффективность. Обеспечивается высокая скорость осаждения, формируются плотные аморфные плёнки, а фазовые превращения при отжиге следуют последовательности  $\gamma \rightarrow \delta \rightarrow \theta \rightarrow \alpha$ .

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-22-20028 (<https://rscf.ru/project/25-22-20028/>) и гранта в форме субсидии, выделяемого Департаментом по научно-технологическому развитию и инновационной деятельности Томской области (Соглашение №02/7/2025).*

# ОСОБЕННОСТИ РОСТА И СТРУКТУРЫ ПЛЕНОК ОКСИДА САМАРИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОПЕРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПАРАМИ ТРИС-ИЗОПРОПИЛЦИКЛОПЕНТАДИЕНИЛА САМАРИЯ (III) И ВОДЫ

М.С. Лебедев

ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
lebedev@niic.nsc.ru

В настоящее время наблюдается вторая волна исследовательского интереса к молекулярному наплавлению (МН, также распространено название «атомно-слоевое осаждение» (АСО, ALD – англ.)) пленок оксидов редкоземельных металлов, во многом движимая запросами нанoeлектроники и катализа. Благодаря сочетанию оптических, электрофизических, каталитических и магнитных свойств, оксид самария  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  рассматривается как перспективный основной или легирующий материал для соответствующих приложений. Высокая гигроскопичность оксидов редкоземельных элементов создает значительные трудности для осуществления процесса МН с использованием паров воды. Эта проблема давно поставлена в литературе, но основными попытками обойти ее решение остаются либо замена паров  $\text{H}_2\text{O}$  на озон  $\text{O}_3$  или кислородную плазму  $\text{O}^*$ , либо осаждение пленок многокомпонентных систем.

В данной работе проводилась разработка процесса МН пленок оксида самария  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  из предшественника трис-изопропилциклопентадиенила самария (III)  $\text{Sm}(\text{i-PrCp})_3$ . Со-реагент – пары  $\text{H}_2\text{O}$ .

400-кратные импульсы подачи паров  $\text{Sm}(\text{i-PrCp})_3$  в реакционную камеру при  $T_p=300\text{--}500^\circ\text{C}$  не привели к детектируемому росту пленок, т.е. предшественник самария не подвергается термораспаду во всем диапазоне исследованных температур.

Проведены исследования влияния параметров процесса попеременной подачи реагентов в реакционную камеру на ростовые характеристики пленок. Исследовались зависимости среднего значения прироста толщины за 1 цикл попеременной подачи (средний рост-за-цикл, СРЗЦ) и распределение толщины пленок по площади реактора (по 21 точке). Варьировались дозы  $\text{Sm}(\text{i-PrCp})_3$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , подаваемые в ходе цикла, время продувки реакционной камеры после импульсов реагентов, температура реакционной камеры  $T_p$ .

Ключевым параметром, влияющим на рост и структуру пленок, оказалась длительность продувки после импульса  $\text{H}_2\text{O}$ . Увеличение времени продувки с 20 до 200 секунд позволило снизить средний рост-за-цикл (СРЗЦ) с 0.35 до 0.23 нм/цикл и повысить равномерность покрытия. Варьирование этого параметра позволяет управлять фазовым составом пленок: длительная продувка (200 с) приводит к образованию равновесной кубической фазы ( $\text{c-Sm}_2\text{O}_3$ ), тогда как короткая (20 с) – к метастабильной моноклинной ( $\text{m-Sm}_2\text{O}_3$ ). Зависимость СРЗЦ от дозы предшественника имеет линейный характер, типичный для CVD-процессов, без выхода на насыщение, характерного для АСО. Наилучшие результаты по стабильности роста и равномерности пленок достигнуты в температурном диапазоне 250–300°C.

Работа подтверждает возможность осаждения пленок  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  с контролируемой структурой методом попеременной обработки поверхности парами  $\text{Sm}(\text{i-PrCp})_3$  и воды и выявляет специфические особенности процесса, связанные с гигроскопичностью оксида. Полученные результаты открывают путь к целенаправленному синтезу пленок с заданными свойствами для применений в нанoeлектронике и катализе.

*Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.*

## МЕТОДЫ МАСКИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ

Е. Д. Стрикалов<sup>1,2</sup>, Д. Ю. Волков<sup>2</sup>, М. В. Меш<sup>2</sup>, А.М. Меш, Ю.С. Кольцов

<sup>1</sup>СПбГТИ(ТУ), *Московский пр-т., 24-26/49, литера А, Санкт-Петербург, 190013*

<sup>2</sup>АО "СКТБ Кольцова", *ул. Маршала Говорова, 29 Лит. О, Санкт-Петербург, 1980952*

strikalov.e@koltsov-kb.ru

Молекулярное наслаивание (МН), другое название - атомно-слоевое осаждение (АСО) в настоящее время является одним из наиболее перспективных методов получения тонких пленок. Данный метод позволяет регулировать толщину получаемого покрытия с точностью до одного монослоя, со степенью конформности близкой к 100%, даже на объектах с большим аспектным отношением (поверхности сложной формы, пористые материалы). Суть метода заключается в поочередной обработке поверхности химическими реагентами при условии максимального удаления от химического равновесия [1].

При необходимости нанесения покрытия только на определенную часть изделия существует проблема, связанная с маскированием областей. В литературе известно весьма ограниченное количество методов [2,3], которые имеют ограничения по химической и термической стойкости материалов масок. Еще одна трудность заключается, как не странно в преимуществе данного метода – реагенты диффундируют в поры и щели под маской, что мешает создавать изделия с четко разграниченными областями.

В настоящей работе были проведены эксперименты по определению границ применимости разных видов масок из различных материалов. Определены такие параметры как: температурная устойчивость, точность маскирования (наличие и ширина дефектов при нанесении), многоразовость, легкость работы(технологичность) и другие.

1. Е. А. Соснов, А. А. Малков, А. А. Малыгин. Нанотехнология молекулярного наслаивания в производстве неорганических и гибридных материалов различного функционального назначения (обзор). I. История создания и развития метода молекулярного наслаивания / Журнал прикладной химии. 2021. 94. 967-985.

2. Zhang C. et al. Patterned films by atomic layer deposition using Parafilm as a mask // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2017. 36. 1.

3. Hashemi Astaneh S. et al. Simple masking method for selective atomic layer deposition of thin films // Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. 2020. 38. 2.

# КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК ОКСИДОВ Ti И Hf ПРИ ОТРАБОТКЕ ПРОЦЕССОВ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

Н.В. Александров<sup>1,2</sup>, Е.П. Кириленко<sup>1</sup>, А.В. Горячев<sup>1</sup>,  
А.А. Дудин<sup>1</sup>, С.С. Зюзин<sup>3</sup>, Г.А. Рудаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИИМЭ РАН, ул. Нагатинская, д. 16а, стр. 11, Москва, 115487

<sup>2</sup>НИТУ МИСИС, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, Москва, 119049

<sup>3</sup>АО НИИМЭ, ул. Ак. Валиева, д. 6, стр. 1, Зеленоград, Москва, 124460

adelsandrov@mail.ru

Атомно-слоевое осаждение (АСО) является ключевым методом синтеза тонких плёнок high-k диэлектриков (в том числе  $\text{HfO}_x$  и  $\text{TiO}_x$ ), обеспечивающим прецизионный контроль толщины и высокую конформность покрытия [1]. Однако при переходе к ультратонким плёнкам (<10 нм) возрастает роль границ раздела: толщина переходных слоёв, состав и структура которых зависят от материала подложки и прекурсора, становится сопоставимой с толщиной всей плёнки. Это приводит к размерному эффекту — значительному отклонению свойств плёнки от свойств объёмного материала, что требует комплексного изучения для корректной интерпретации оптических и функциональных характеристик и последующей оптимизации процесса АСО.

В данной работе проведены комплексные исследования тонких плёнок  $\text{HfO}_x$  и  $\text{TiO}_x$ , полученных методом АСО. Установлено, что при отработанных условиях осаждения плёнки  $\text{TiO}_x$  формируются в аморфном состоянии (рис. 1 а). При этом на начальные стадии роста существенное влияние оказывает природа прекурсора: использование соединений, содержащих аминогруппу, приводит к образованию  $\text{TiN}$  в начале процесса. Не менее важным фактором является взаимодействие с подложкой и образование промежуточных химических соединений на границе раздела. Так, при осаждении на кремниевую подложку на границе раздела наблюдается образование силицида титана. Возрастающая роль переходных слоёв в ультратонких плёнках приводит к переменному составу по их толщине (рис. 1 б).

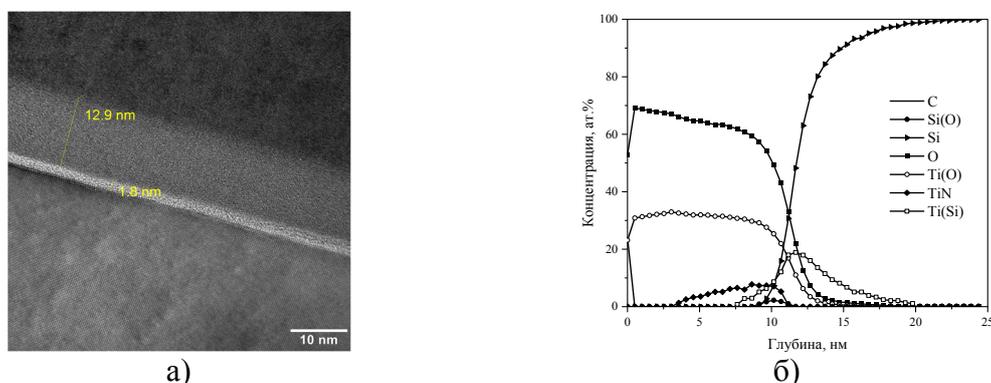


Рис. 1 – ПЭМ изображение плёнки  $\text{TiO}_x$  (а); распределение концентраций химических соединений по толщине той же плёнки, полученное методом электронной оже-спектроскопии (б)

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 23-91-06000).

1. John Robertson [et al.] Materials Science and Engineering. R 88 (2015) 1–41.

## МОСVD МАТЕРИАЛОВ СПИНТРОНИКИ

М.Н. Маркелова, И.Э. Грабой, А.А. Хафизов, А.Р. Кауль

*Химический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Ленинские горы, 1с3, Москва, 119991  
pomar-ka@yandex.ru*

Современная наука и техника широко используют оксидные материалы с различными функциональными свойствами в виде тонких пленок, представляющих собой особый класс материалов, в которых взаимосвязи состав-структура-свойства осложняются влиянием подложки, приводящей, зачастую, к гетероэпитаксии, образованию вариантных структур и возникновению упругой деформации кристаллизующихся пленок. Зависимость этих явлений от способов и условий получения пленок чрезвычайно разнообразят наблюдаемые эффекты и открывают новые возможности воздействия на свойства функциональных материалов.

Лаборатория химии координационных соединений МГУ имени Ломоносова успешно развивает метод химического осаждения оксидных пленок из паровой фазы металлоорганических соединений (МОСVD). Среди разрабатываемых в настоящее время материалов основной акцент сделан в сторону материалов спинтроники – стремительно развивающейся области электроники, в которой ключевую роль играет не заряд, а спин электрона. Спиновые токи, в отличие от зарядовых, могут передавать информацию (на гигагерцовых и терагерцовых частотах) без сопровождающего их переноса заряда, а следовательно — без джоулева нагрева. Для применения в спинтронике ведутся исследования процессов получения, структуры и свойств тонких пленок ферро- и ферримагнитных (ФМ) материалов – редкоземельных феррогранатов  $R_3Fe_5O_{12}$  ( $R = PЗЭ$ ),  $CrO_2$ ,  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ,  $NiFe_2O_4$ ,  $Fe_3O_4$ , антиферромагнетиков (АФМ) –  $Cr_2O_3$ ,  $\alpha-Fe_2O_3$ ,  $NiO$ ,  $SrMnO_3$ , а также гетероструктур типа ФМ/АФМ.

Большое место занимают исследования и применение эффекта стабилизации фаз в форме эпитаксиальных пленок. Последние работы сосредоточены на МОСVD тонких пленок феррогранатов РЗЭ и исследовании взаимосвязи их свойств с реальной структурой. Эти исследования приобрели особую актуальность в связи с потребностями спинтроники в тонкопленочных ФМ и нанотолщинных гетероструктурах ФМ/АФМ. В докладе представлены последние достижения в развитии технологии осаждения пленок в установках с нитепротяжным питателем [1,2] и осаждения в парах летучего флюса, а также атмосферного CVD, которые успешно применяются нами для синтеза пленок спинтронного назначения. Выявлено влияние упругих эпитаксиальных напряжений на важнейшую характеристику – ширину линии ферромагнитного резонанса (ФМР). Проанализированы явления химического взаимодействия на границе пленок с подложкой  $Gd_3Ga_5O_{12}$ . Экспериментально доказан факт заселения ионами РЗЭ не только додекаэдрических, но также и октаэдрических позиций (нормально занимаемых только ионами железа) структуры граната, что приводит к получению пленок РЗЭ-избыточных составов  $R_{3+x}Fe_{5-x}O_{12}$ , не характерных автономным материалам в тех же оксидных системах. Показано, что склонность к образованию антиструктурных дефектов ослабевает с увеличением ионного радиуса РЗЭ. Впервые эпитаксиальные пленки граната  $Lu_3Fe_5O_{12}$  получены методом МОСVD на монокристаллических подложках  $Gd_3Ga_{5-y}Al_yO_{12}$  ( $y = 1; 2$ ), имеющих малое рассогласование параметров ЭЯ на интерфейсе с пленкой.

1. Кауль А. Р., Нигаард Р. Р. и др. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2021. Т.23, № 3. С. 396.

2. Маркелова М.Н., Хафизов А.А. и др.// Конденсированные среды и межфазные границы. 2024. Т.1, №27. С. 104.

## Стабильные резистивные переключения в пленках VO<sub>2</sub>, синтезированных на вертикальных наностенках h-BCN

К.Е. Капогузов<sup>1,2</sup>, С.В. Мутили<sup>1</sup>, С.В. Белая<sup>3</sup>, В.Н. Кичай<sup>3</sup>, Л.В. Яковкина<sup>3</sup>,  
И.В. Корольков<sup>3</sup>, А.А. Сараев<sup>4</sup>, М.Л. Косинова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ИФП СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup> НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090

<sup>3</sup> ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>4</sup> ИК СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 5, Новосибирск, 630090

k.kapoguzov@isp.nsc.ru

Растущие требования к скорости вычислений и энергоэффективности электронных компонентов наталкиваются на фундаментальные ограничения стандартной кремниевой технологии. В этой связи в настоящий момент идет поиск и исследование новых функциональных материалов [1]. Одним из наиболее перспективных среди таких материалов является диоксид ванадия (VO<sub>2</sub>) благодаря своему уникальному фазовому переходу из полупроводника в металл при температуре  $\approx 68$  °С, при котором резко и обратимо меняются его параметры [2]. Для создания стабильных и долговечных вычислительных элементов на основе VO<sub>2</sub> необходимо добиться не менее  $10^{10}$  воспроизводимых циклов переключений. При этом, в поликристаллических в пленках VO<sub>2</sub>, синтезируемых на стандартных жестких подложках (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Si и SiO<sub>2</sub>) это число, как правило, ограничено и составляет от  $10^6$  до  $10^8$ . Это ограничение связано с микроструктурными неоднородностями, наличием межзеренных границ и механических напряжений, возникающих на границе раздела пленка/подложка при фазовом переходе. Для преодоления этих проблем возможны различные подходы: выбор гибких подложек, которые подстраивались бы под механические напряжения при фазовом переходе в VO<sub>2</sub>, формирование наноструктур, в которых за счет малых размеров происходили бы только упругие релаксации напряжений или использование подложек с развитой морфологией поверхности, в которых реализовывался бы малый контакт VO<sub>2</sub> с подложкой. Одним из таких материалов с развитой морфологией является гексагональный карбонитрид бора, синтезированный в виде вертикальных наностенок (h-BCNNWs) [3].

В данной работе представлены результаты исследования пленок VO<sub>2</sub> на структурах h-BCNNWs/Si(100). Сформированные структуры VO<sub>2</sub>/h-BCNNWs/Si(1000) демонстрируют обратимый резкий скачок сопротивления примерно в  $10^3$  раз при температуре около 68 °С. На основе синтезированных пленок VO<sub>2</sub> были сформированы двухконтактные резистивные переключатели и показано, что скачок тока при фазовом переходе в них составляет 40-70 раз. Были проведены исследования стабильности переключений полученных структур и показано, что использование вертикальных наностенок h-BCN в качестве подложек позволяет увеличить число стабильных резистивных переключателей на порядки по сравнению с пленками VO<sub>2</sub> на подложках SiO<sub>2</sub>/Si. Установлено, что число стабильных резистивных переключений в структурах VO<sub>2</sub>/h-BCNNWs/Si(1000) увеличивается с увеличением толщины h-BCNNW с 50 до 400 нм до значения  $2 \cdot 10^9$  раз.

Полученные в работе результаты открывают путь к созданию высокостабильных и долговечных функциональных устройств на основе поликристаллических пленок VO<sub>2</sub>, таких как сенсоры, модуляторы, переключатели и активные элементы нейроморфных систем.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

[1] Keyes R.W. Fundamental limits of silicon technology // Proc. IEEE. 2001. Vol. 89, № 3. P. 227–239.

[2] Ke Y. et al. Vanadium Dioxide: The Multistimuli Responsive Material and Its Applications // Small. 2018. Vol. 14, № 39. P. 1802025.

[3] Belaya S. V. et al. Boron Carbonitride Films with Tunable Composition: LPCVD and PECVD Synthesis Using Trimethylamine Borane and Nitrogen Mixture and Characterization // Appl. Sci. 2023. Vol. 13, № 8. P. 4959.

# УСТАНОВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ФАЗОВЫМ СОСТАВОМ И ОПТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ В ОКСИДНЫХ СИСТЕМАХ $\text{HfO}_2\text{--TiO}_2$ И $\text{ZrO}_2\text{--TiO}_2$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

Хижняк Е.А., Юшина И.В., Лебедев М.С., Шаяпов В.Р.  
ИНХ СО РАН, пр. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, Россия  
khizhnyak@niic.nsc.ru

Развитие современной оптоэлектроники требует создания материалов с заданными и воспроизводимыми оптическими характеристиками. Тонкие пленки оксидов  $\text{HfO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$  с большим значением ширины запрещенной зоны  $E_g$  широко исследуются для применения в качестве затворных диэлектриков, элементов памяти и защитных покрытий, компонентов интегральной фотоники. Введение катионов  $\text{Ti}^{4+}$  в решетку  $\text{HfO}_2$  или  $\text{ZrO}_2$  с образованием твердых растворов  $\text{Hf}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  и  $\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  позволяет эффективно снижать  $E_g$  и повышать показатель преломления  $n$ , обеспечивая тонкую настройку оптических свойств. Метод атомно-слоевого осаждения (АСО) является предпочтительным для синтеза таких пленок благодаря своей способности к точному контролю толщины, превосходной однородности и конформности на подложках. Ключевой задачей является проведение комплексного исследования, направленного на установление взаимосвязи между химическим составом, структурным состоянием и оптическими свойствами тонких пленок оксидных системах  $\text{Hf}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  и  $\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  синтезированных методом АСО.

В настоящей работе проведено исследование оптических свойств пленок  $\text{Hf}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  и  $\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  в полном диапазоне составов ( $x=0\dots 1$ ) методами эллипсометрии и спектрофотометрии. Фазовый состав пленок устанавливался методом рентгенофазового анализа (РФА).

Для осаждения пленок  $\text{Hf}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  и  $\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  циклы осаждения соответствующих оксидов объединялись в суперциклы вида  $a[\text{TDEAH}+\text{H}_2\text{O}]+b[\text{TiCl}_4+\text{H}_2\text{O}]$  и  $a[\text{TEMAZ}+\text{H}_2\text{O}]+b[\text{TiCl}_4+\text{H}_2\text{O}]$ , где  $a$  и  $b$  — количество циклов, а их соотношение варьировалось в диапазоне 0:1, 1:7, 1:3, 1:2, 1:1, 2:1, 3:1, 7:1, 1:0 ( $a:b$ ). Количество суперциклов для каждого состава было подобрано таким образом, чтобы обеспечить толщину всех полученных пленок в интервале 50–55 нм. Методом РФА показано, что свежесозаженные пленки рентгеноаморфны, за исключением индивидуальных оксидов  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ . Высокотемпературный отжиг при 700 °С в вакууме ( $\sim 10^{-4}$  мм рт. ст.) приводит к частичной кристаллизации всех пленок.

Установлено нелинейное возрастание  $n$  ( $\lambda=632,8$  нм) от  $\sim 2.05$  для  $\text{HfO}_2$  ( $\sim 2.13$  для  $\text{ZrO}_2$ ) до  $\sim 2.46$  для  $\text{TiO}_2$ . Значения  $E_g$  уменьшаются от  $\sim 5.8$  эВ для  $\text{HfO}_2$  ( $\sim 5.7$  эВ для  $\text{ZrO}_2$ ) до  $\sim 3.4$  эВ для  $\text{TiO}_2$ . Добавление минимального количества титана (составы 1:7) приводит к резкому уменьшению ширины запрещенной зоны и увеличению показателя преломления. Данный факт согласуется с теоретическими представлениями о возникновении качественно новой электронной зонной структуры при образовании твердых растворов с титаном. Нелинейность обнаруженных зависимостей  $E_g$  и  $n$  от состава связано с изменениями фазового состава пленок, в частности с присутствием фаз титанатов при  $x=0.25\dots 0.5$ . Отжиг приводит к увеличению  $n$  и уменьшению  $E_g$ , что обусловлено кристаллизацией аморфной матрицы.

*Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.*

# ИЗУЧЕНИЕ ВТОРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ МОСVD И ALD

Э.А. Рихтер, И.В. Корольков, И.К. Игуменов, Е.С. Викулова  
ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
tapochic@gmail.com

Одной из приоритетных задач современной микроэлектроники является разработка устройств для усиления слабых электрических сигналов – электронных умножителей. Физической основой функционирования данных устройств служит явление вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ), заключающееся в испускании электронов поверхностью твёрдого тела при бомбардировке первичными электронами. Её количественная характеристика – коэффициент вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) – отношение числа эмитированных вторичных электронов к числу падающих первичных электронов.

В связи с этим актуальна разработка пленочных композиционных структур, включающих эмиссионный (обладающий высоким КВЭЭ) и ионобарьерный (предотвращающий выбивание ионов из материала подложки) слои. Поскольку наиболее эффективные электронные умножители (микроканальные пластины) имеют сотовую структуру, для формирования функциональных покрытий на них применимы исключительно методы химического газофазного осаждения металлоорганических соединений (МОСVD) и родственные им технологии, такие как атомно-слоевое осаждение (ALD).

Для модификации обычно рассматривают материалы на основе MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В качестве альтернативы, в данной работе впервые изучены ВЭЭ свойства плёнок MgF<sub>2</sub>, полученных методом МОСVD из трёх различных прекурсоров: [Mg(tmeda)(hfac)<sub>2</sub>] (tmeda = N,N,N',N'-тетраметилэтилендиамин, hfac<sup>-</sup> = 1,1,1,5,5,5-гексафторпентандион-2,4-ат) и [Mg(tmeda)(ofhac)<sub>2</sub>] (ofhac<sup>-</sup> = 1,1,1,2,2,6,6,6-октафторгександион-3,5-ат) и [Mg(bipy)(hfac)<sub>2</sub>] (bipy = 2,2'-бипиридин), а также плёнок системы Zr – Hf – O, полученных методом ALD. Установлено, что плёнки MgF<sub>2</sub>, осаждаемые при 450-550°C, имеют перспективные эмиссионные характеристики, причем наиболее высокие КВЭЭ (4.5-4.7 при 400 эВ) достигаются при максимальной температуре и общий характер изменений не зависит от прекурсора (рис. 1а). Это указывает на приоритет влияния кристалличности над морфологией. Достигнутые значения КВЭЭ сохраняются при длительном хранении на воздухе, в отличие от MgO. Для плёнок системы Zr – Hf – O показано, что при увеличении толщины от 30 до 120 нм, КВЭЭ возрастает от 3.4 до 5.3 (400 эВ, рис. 1б). Сравнение с образцами ZrO<sub>2</sub> и HfO<sub>2</sub> сопоставимой толщины демонстрирует преимущество двухкомпонентной системы, в сравнении с индивидуальными материалами (рис. 1в).

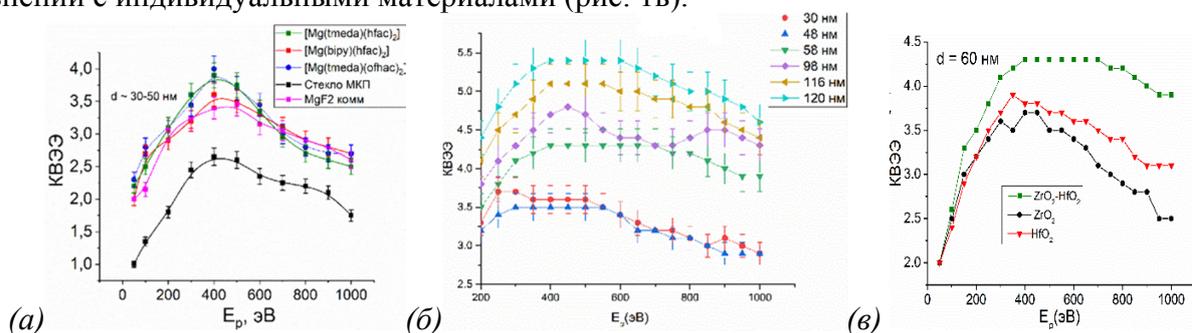


Рис. 1. Зависимости КВЭЭ от энергии первичных электронов для: (а) плёнок MgF<sub>2</sub> толщиной 30-50 нм полученных методом МОСVD; (б) плёнок системы Zr – Hf – O различной толщины; (в) плёнок ZrO<sub>2</sub> + HfO<sub>2</sub> толщиной 60 нм в сравнении с плёнками ZrO<sub>2</sub> и HfO<sub>2</sub> сопоставимой толщины.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 24-79-10272.

# РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ $Al_2O_3$ - $TiO_2$ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ СЕРЕБРЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

Исубгаджиев Ш.М.<sup>1,2</sup>, Амашаев Р.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»

<sup>2</sup>ООО «Технологии АСО покрытий»

isubgadjiiev2001@mail.ru

Серебряные изделия в процессе длительного хранения подвергаются воздействию негативных факторов окружающей среды, что приводит к развитию коррозионных процессов на их поверхности. Поверхностные окислительно-восстановительные процессы вызывают изменения внешнего вида и утрату первоначальной привлекательности изделий. Одним из эффективных подходов к предотвращению коррозии является применение тонкопленочных покрытий на основе оксидов металлов, которые обладают отличными защитными свойствами.

В данной работе в качестве защитных покрытий на серебряных изделиях использовались нанопленки на основе смеси оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и диоксида титана ( $TiO_2$ ), полученные методом атомно-слоевого осаждения (АСО). Технологический процесс формирования покрытий методом АСО был оптимизирован, что позволило получить практически невидимые пленки, которые не изменяют внешний вид изделий и сохраняют их эстетические качества.

Также полученные пленки  $Al_2O_3$  -  $TiO_2$  разных толщин на поверхности образцов из серебра в сравнении с образцами серебра без покрытий были испытаны на устойчивость в агрессивной среде на основе раствора серы в толуоле (рисунок 1).

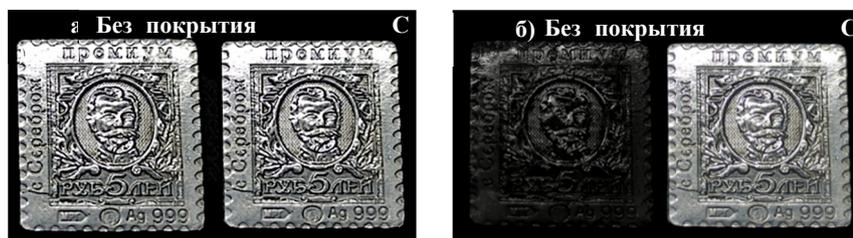


Рис. 1. Результаты выдержки серебряных жетонов с защитным покрытием и без защитного покрытия в агрессивной среде: (а) до погружения в раствор серы, (б) после выдержки в растворе серы.

В отличие от необработанного серебра, образцы с покрытием  $Al_2O_3$ - $TiO_2$  показали значительно высокую коррозионную стойкость в серном растворе. Если чистые образцы серебра темнели практически моментально (в течение 30 секунд), то на покрытых образцах первые точечные очаги сульфидирования наблюдались только спустя 5 часов испытаний. Существенное увеличение площади сульфидного слоя наблюдалось после 6 часов выдержки. Полученные данные свидетельствуют об эффективности данного покрытия для продления времени сохранения первоначального вида серебряных изделий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям, (проект 303623), а также, частично, в рамках Госзадания (FZNZ-2020-0002).*

## ОПТИЧЕСКАЯ НАНОСКОПИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

А.Г. Милёхин<sup>1</sup>, И.А. Милёхин<sup>1,2</sup>, А.В. Тараненко<sup>1</sup>, Л.С. Басалаева<sup>1</sup>,  
К. Киселев<sup>1</sup>, Н.Н. Курусь<sup>1</sup>, Р.Б. Васильев<sup>3</sup>, А.В. Царев<sup>1</sup>,  
Л.Н. Дворецкая<sup>4</sup>, Э.О. Чиглинцев<sup>5,6</sup>, А.И. Чернов<sup>5</sup>, А.В. Латышев<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>ИФП СО РАН им.А.В.Ржанова, просп. Акад. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090  
<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090  
<sup>3</sup>МГУ им. М.В.Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991  
<sup>4</sup>СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, улица Хлопина, 8, к. 3 А, г. Санкт-Петербург, 194021  
<sup>5</sup>МФТИ, ул. Тверская, д. 11, стр. 1, 4, г. Москва, 125009  
<sup>6</sup>РКЦ, Большой бульвар, 30с1, Москва, Сколково, 121205  
milekhin@isp.nsc.ru

Методы оптической наноскопии, включая плазмон-усиленное комбинационное рассеяние света (нано-КРС) и фотолюминесценцию (нано-ФЛ), основаны на локальном усилении оптического сигнала от наноструктур, находящихся в ближнем поле поверхностного плазмона металлизированного зонда атомно-силового или сканирующего туннельного микроскопа (АСМ или СТМ), и успешно применяются для изучения оптических свойств органических и неорганических наноструктур, включая монослойные покрытия, отдельные наноструктуры и молекулы с пространственным разрешением много меньше дифракционного предела.

В настоящей работе обсуждаются современные достижения и проблемы оптической наноскопии в исследовании полупроводниковых наноструктур.

Обсуждаются важнейшие результаты последних лет по изучению оптических свойств двумерных (2D), одномерных (1D) и нульмерных (0D) отдельных полупроводниковых наноструктур методами нано-КРС и нано-ФЛ.

Демонстрируются возможности нано-КРС и нано-ФЛ картирования одиночных полупроводниковых 2D, 1D и 0D наноструктур, включая графен, мультиграфен, монослой дихалькогенидов металлов, нанопроволоки GaAs, AlN, GaP с нанометровыми вставками GaAsP и нанокристаллы CdSe, GaAs для установления их колебательных и электронных свойств, определения размера и формы наноструктур, локальных структурных дефектов, механических напряжений и величины локального электромагнитного поля. Обсуждается влияние энергии возбуждения и поляризации на изображения нано-КРС от отдельных наноструктур.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект №22-12-00302 П).*

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПЕРОВСКИТЫ В СОВРЕМЕННОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ

О.И. Семенова

*ИФП СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090*

*oisem@isp.nsc.ru*

В конце прошлого века перовскиты активно изучали в качестве высокотемпературных сверхпроводников. Однако с 2014 года начались исследования синтетических гибридных перовскитов и их применение в различных оптоэлектронных устройствах: в солнечных элементах, светоизлучающих диодах, лазерах, мемристорах, датчиках гамма и рентгеновского излучения [1]. Гибридные перовскиты – класс новых синтетических полупроводников с общей формулой  $ABX_3$ , где  $A = CH_3NH_3$  (метил аммоний),  $CH_5N_2$  (формамединий), Cs (цезий);  $B = Pb$  (свинец), Sn (олово); и  $X = Cl$  (хлор), Br (бром), I (йод). Высокий коэффициент поглощения в широком диапазоне длин волн, большая диффузионная длина носителей зарядов, устойчивость параметров к дефектам, высокий квантовый выход фотолуминесценции и настраиваемый диапазон ширины запрещенной зоны за счет варьирования галогенов в составе – все это способствовало развитию фундаментальных исследований и применению перовскитов в оптоэлектронных устройствах. Возможность получения перовскитов при низких температурах без дорогого вакуумного оборудования также является их преимуществом. Наиболее разработанной областью применения перовскитов является фотовольтаика. В настоящее время достигнуто значение эффективности лабораторного перовскитного солнечного элемента (СЭ) 25,2% [2]. Настоящим прорывом в последние годы стали исследования и разработки перовскитных tandemных солнечных элементов с кремнием. В таком СЭ коротковолновая часть солнечного спектра поглощается слоем перовскита, а прошедшая длинноволновая часть поглощается кремниевым солнечным элементом. КПД такой структуры выше, чем по отдельности у кремниевого и у перовскитного солнечного элемента. Это способ расширить возможности кремниевых солнечных элементов, использовать имеющиеся производственные мощности, дать им фактически второе рождение. Рекордное значение эффективности tandemного СЭ - 33,7 %. Немецкая компания Oxford PV выпускает перовскит-кремниевый СЭ с эффективностью 26,9%. Это выше показателей лучших современных кремниевых панелей такой же площади.

Очень востребованное направление использования перовскитов – создание светоизлучающих устройств (LED). Применение нанокристаллов позволяет формировать RGB-дисплеи — это устройства, которые создают цветные изображения, смешивая красный (Red), зелёный (Green) и синий (Blue) цвета с разной интенсивностью. Такая аддитивная цветовая модель позволяет получать более 16 миллионов различных оттенков на экранах мониторов, телевизоров и других устройствах.

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания № FWGW-2025-0024*

1. Lixiu Zhang et al. Advances in the Application of Perovskite Materials. Nano-Micro Lett. 2023. 15. 177.
2. Liang, Z. et al. Homogenizing out-of-plane cation composition in perovskite solar cells. Nature (2023). 624. 557–563.

# ЕМКОСТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГЕТЕРОГРАНИЦЫ МЕЖДУ КРЕМНИЕМ И СЛОЯМИ ОКСИДА ГАЛЛИЯ И АЛЮМИНИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ALD.

А.И. Баранов<sup>1</sup>, А.В. Уваров<sup>1</sup>, Е.А. Вячеславова<sup>1</sup>, А.А. Максимова<sup>1,2</sup>,  
О.П. Михайлов<sup>1</sup>, В.А. Поздеев<sup>1,2</sup>, Э.Я. Ярчук<sup>2</sup>, А.С. Гудовских<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, ул. Хлопина, 8к3, лит А, Санкт-Петербург, 194021

<sup>2</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197022  
baranov\_art@spbau.ru

Рекордные современные однопереходные солнечные элементы на кремниевых подложках сделаны на основе НІТ-технологии (heterojunction with intrinsic thin layer) [1]. Однако, аморфный кремний, используемый в них в качестве эмиттера, обладает рядом недостатков: потери на поглощении части спектра, деградация свойств со временем, отсутствие возможности конформного осаждения на развитую поверхность. С другой стороны, перспективными материалами являются оксиды Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выращенные ALD, для пассивации планарной и развитой поверхности кремния с лицевой стороны, в частности, при использовании так называемого черного кремния (black silicon, b-Si), преимуществом которого является низкое отражение (менее 5%) практически во всем диапазоне поглощения. Такая поверхность кремния ранее была получена криогенным травлением методом индуктивно-связанной плазмы в газовой смеси SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> без образования дефектов в объеме кремния [2]. В отличие от аморфного кремния пассивирующие слои Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> могут быть выращены конформно толщиной 1-10 нм на таком рельефе подложки кремния, что позволит создать высокоэффективные солнечные элементы. В данной работе будут исследованы слои Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выращенные на планарной и развитой поверхности кремния методом ALD с потоком азота в качестве источника кислорода [3], емкостными методами.

В работе были сформированы МДП-структуры на Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si, и методами спектроскопии полной проводимости (рисунок 1) и нестационарной спектроскопии глубоких уровней изучено дефектообразование на планарных и развитых границах с кремнием. В результате плотность поверхностных состояний в Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si составила 2.6·10<sup>12</sup> и 5.0·10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>эВ<sup>-1</sup> соответственно, и в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si - 3.1·10<sup>10</sup> и 2.8·10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>эВ<sup>-1</sup> соответственно. Полученные значения находятся в хорошем соответствии с измеренными временами жизни в таких структурах, что делает эти слои перспективными для фотовольтаики.

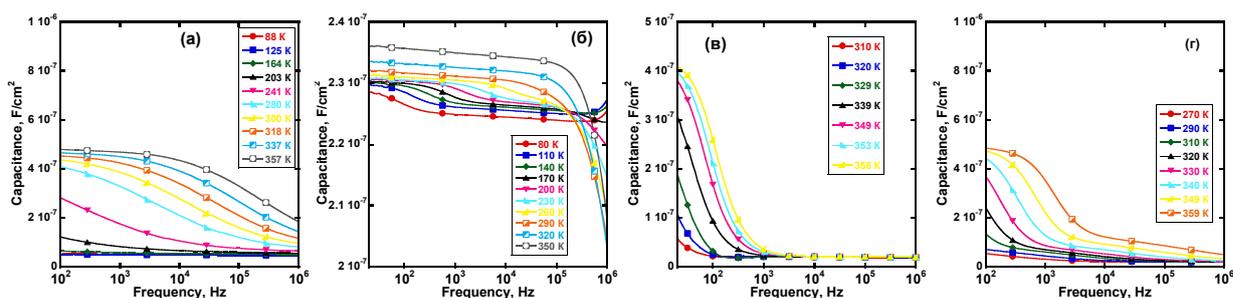


Рис.1 Кривые C-f при разных температурах для МДП-структур на Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si на планарном (а и б) и черном (в и г) кремнии соответственно.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10275, <https://rscf.ru/project/24-79-10275/>.

1. K. Yoshikawa et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. Elsevier B.V. 2017, Vol. 173, P. 37
2. E.A. Vyacheslavova, I.A. Morozov et al. // ACS Omega. 2022. Vol. 7, P.6053-6057.
3. A.V. Uvarov, A.I. Baranov et al. // Applied surface Science. 2026. Vol.719. P.165092.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОПОРИСТОСТИ СЛОЕВ НИТРИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

О.К.Иванова<sup>1,2</sup>, С.А.Божко<sup>2</sup>, Д.А.Подгорный<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСИС», Ленинский проспект, д. 4, стр. 1, г. Москва, 109316

<sup>2</sup>ООО «Мэппер», Волгоградский проспект, 42, к5, помещ.1, г. Москва, 109316

olga.ivanova@mapperrllc.ru

Тонкие плёнки нитрида кремния ( $\text{SiN}_x$ ), осаждённые при низких температурах с контролируемыми внутренними напряжениями, играют ключевую роль в технологии микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС). При создании таких структур важно учитывать совместимость с микросхемами считывания и обработки сигналов, выполненными по интегральной технологии, а также с функциональными слоями МОЭМС-устройств, что ограничивает допустимую температуру обработки до 200–300 °С [1]. Низкотемпературное плазмохимическое осаждение из газовой фазы (PECVD) слоев  $\text{SiN}_x$  позволяет получать изолирующие и механически прочные диэлектрические слои без риска термического повреждения чувствительных элементов изделия. Кроме того, контроль внутренних напряжений остаётся критически важным для стабильности и надёжной работы микромеханических компонентов.

В данной работе изучается влияние рабочих параметров PECVD-осаждения на структуру и механические свойства формируемых пленок  $\text{SiN}_x$ . Для это была получена серия пленок при разных составах газовой смеси, температуры процесса и мощности плазмы. Оценивалось изменение оптических свойств, структуры и морфологии поверхности получаемых пленок методами спектральной эллипсометрии и электронной микроскопии. Установлено, что варьирование параметров процесса приводит к значительным изменениям уровня внутренних напряжений. Для оценки дефектов строения нитрида кремния была предложена методика количественного анализа напористости на базе просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [2].

1. Blumenthal D. J. et al. Silicon nitride in silicon photonics //Proceedings of the IEEE. 2018. Т. 106. №. 12. С. 2209-2231.
2. Bulgarelli et al. Dendritic Cell Vaccination in Metastatic Melanoma Turns “Non-T Cell Inflamed” Into “T-Cell Inflamed” Tumors // Tumors. Front. Immunol. V.10, art. 2353, 2019.

# ГАЛОГЕНЗАМЕЩЕННЫЕ ФТАЛОЦИАНИНЫ МЕТАЛЛОВ: ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО СТРОЕНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И СЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК

Т.В. Басова, Д.В. Бонегардт, Д.Д. Клямер, А.С. Сухих  
<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
basova@niic.nsc.ru

Несмотря на то, что галогензамещенные фталоцианины были синтезированы достаточно давно [1], в последние два десятилетия вновь возник интерес к этим производным. Это связано с тем, что введение галоген-заместителей во фталоцианиновое кольцо приводит к изменению типа проводимости [2] и повышению чувствительности к газам-аналитам электронодонорной природы [3]. Еще одной важной особенностью фтор- и хлорзамещенных производных является их способность переходить в газовую фазу без разложения в вакууме, поэтому для получения пленок этих фталоцианинов используют метод физического осаждения из газовой фазы (PVD).

В данной работе представлен обзор результатов, полученных нашей научной группой за последние несколько лет, по исследованию влияния молекулярного строения галогензамещенных фталоцианинов металлов  $MPcHal_x$  ( $M=Cu, Co, Zn$ , и др.) на структурные особенности и сенсорные свойства их тонких пленок. Основное внимание будет уделено исследованию пленок  $MPcHal_x$ , полученных методом PVD, и их исследованию в качестве активных слоев адсорбционно-резистивных сенсоров на аммиак. Показано, что все исследованные пленки проявляют обратимый сенсорный отклик на аммиак при комнатной температуре. Изучено влияние количества, положения и типа галоген-заместителей на величину сенсорного отклика пленок. Установлено, что в ряду  $MPcF_x$  ( $x = 0, 4, 8, 16$ ) наибольшим откликом обладали тетрафторзамещенные фталоцианины металлов. На примере тетрафтор- и тетрахлорзамещенных фталоцианинов цинка показано, что фталоцианины с галоген-заместителями в периферийных положениях фталоцианинового кольца обладают большим откликом и низким пределом обнаружения аммиака по сравнению с непериферийно-замещенными аналогами. В свою очередь, хлорзамещенные фталоцианины обладают более высоким сенсорным откликом на аммиак по сравнению с фторзамещенными фталоцианинами. Будут приведены примеры использования гетероструктур металл/ $MPcHal_x$ , полученных газозонными методами, в качестве активных слоев химических сенсоров.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.*

1. Stuzhin P.A. Fluorinated phthalocyanines and their analogues // Fluorine in Heterocyclic Chemistry Volume 1. Springer, 2014. P. 621–681.
2. Shao X., Wang S., et al. // Dyes Pigment. 2016. V. 132. P. 378–386.
3. Klyamer D., Sukhikh A., et al. // Sensors. 2018. V. 18. P. 2141.

# ФОРМИРОВАНИЕ СОКРИСТАЛЛОВ И СМЕШАННЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ТЕТРАФТОРОФТАЛОЦИАНИНА КОБАЛЬТА И НЕЗАМЕЩЕННОГО ФТАЛОЦИАНИНА ЦИНКА

Д.В. Бонегардт<sup>1</sup>, Е.П. Пинчукова<sup>2</sup>, А.С. Сухих<sup>1</sup>, Д.Д. Клямер<sup>1</sup>, Т.В. Басова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090

bonegardt@niic.nsc.ru

Фталоцианины (MPC) и их производные остаются в центре научного внимания благодаря широкому спектру функциональных свойств — от применения в качестве красителей до использования в органической электронике и фотодинамической терапии. Наиболее эффективными с точки зрения управления свойствами фталоцианинов стратегиями модификации являются замена центрального металла и введение заместителей в периферию макроцикла. Галогензамещённые производные, особенно тетрагалогенфталоцианины, демонстрируют улучшенные сенсорные и электрофизические характеристики, а также способность к сублимации в вакууме без разложения, что обеспечивает возможность применения метода PVD для формирования однородных пленок с воспроизводимыми характеристиками.

Несмотря на значительные достижения — включая структурные, морфологические и сенсорные исследования гексадекафтор-, тетрафтор-, тетрахлор- и октазамещённых комплексов фталоцианинов и др., выполненные нашей группой ранее — ключевым ограничением сенсоров на их основе остаётся низкая проводимость, требующая дорогостоящего оборудования для регистрации резистивного отклика. Кроме того, зачастую проблемой оказывается низкая селективность сенсора к газам схожей природы, например, к ряду аминов.

Перспективным направлением, которое может помочь преодолеть указанные выше ограничения является сокристаллизация — стратегия “co-crystal engineering”, позволяющая комбинировать донорные и акцепторные компоненты для создания материалов с новыми функциональными свойствами. Предполагается, что совместная кристаллизация фталоцианина с другим фталоцианином, а также с другими молекулами может позитивно повлиять как на сенсорные характеристики, так и на проводимость фталоцианинового слоя.

Данная работа представляет собой первые попытки получения смешанных фталоцианинов и их пленок. Так, в системе ZnPc-CoPcF<sub>4</sub> (ZnPc – незамещённый фталоцианин цинка, а CoPcF<sub>4</sub> – тетрафторзамещённый фталоцианин кобальта, с атомами фтора в периферийном положении) были получены смешанные кристаллические порошки с различным содержанием фталоцианинов, для двух составов выращены монокристаллы, а также получены смешанные пленки. В результате было продемонстрировано, что молекулы фторированного фталоцианина кобальта могут замещать молекулы фталоцианина цинка без фазовых изменений. Кроме того, при большом количестве кобальтового производного удается стабилизировать низкотемпературную фазу фталоцианина цинка при высокотемпературной сублимации. Спектральные исследования образцов указывают на наличие коротких контактов в местах нахождения атома фтора и, вероятно, образование водородных связей.

Таким образом, успешно удалось получить кристаллические порошки, а также пленки методом PVD смешанных фталоцианиновых систем для дальнейшего применения в качестве активных слоев адсорбционно-резистивных газовых сенсоров.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 25-73-00134).*

## ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

А.Л. Богословцева<sup>1</sup>, В.Р. Шаяпов<sup>1,2</sup>, С.Ю. Чепкасов<sup>1</sup>, М.И. Миронова<sup>1</sup>,  
А.В. Капишников<sup>1</sup>, В.А. Володин<sup>1</sup>, Д.В. Марин<sup>1</sup>, П.В. Гейдт<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090  
<sup>2</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
a.bogoslovtseva@g.nsu.ru

Пьезоэлектрические свойства нитрида алюминия (AlN) в совокупности с высокой теплопроводностью и стойкостью к высоким температурам делают AlN перспективным материалом для создания компонентов акустоэлектронных устройств радиотехники – радиочастотных фильтров [1,2]. На основе пленок AlN строятся тонкопленочные пьезоэлектрические резонаторы на объемных или поверхностных акустических волнах [3,4]. Для получения пленок AlN с целью их применения в радиотехнических приложениях наиболее подходит метод магнетронного распыления [5], позволяющий с достаточно высокими скоростями роста получать высоко текстурированные пленки AlN с гексагональной структурой [6,7].

Данная работа направлена на исследование строения и свойств пленок AlN, осажденных методом импульсного магнетронного распыления на постоянном токе при разных температурах подложки от 60 до 300 °C и мощности магнетрона 300 Вт. Исследования проводились методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМВР), рентгенофазового анализа (РФА), эллипсометрии, инфракрасной (ИК) спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

Полученные из данных РФА значения микронапряжений по мере роста температуры осаждения уменьшаются, поскольку возрастает роль диффузии в объеме растущей пленки и происходит упорядочение микроструктуры пленки. Методом эллипсометрии установлен рост показателя преломления пленок с ростом температуры осаждения, что указывает на упорядочение и уплотнение структуры пленки по мере увеличения температуры осаждения. Данная закономерность связана с увеличением подвижности атомов, сорбированных на подложку с ростом ее температуры. Фоновые пики также становятся более интенсивными при увеличении температуры осаждения, что также указывает на повышение кристалличности пленок.

1. Assylbekova M., Chen G., et al. // 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Gainesville, FL, USA: IEEE, 2021. P. 202-205.
2. Zou Y., Pang H. F. et al. // Microsyst. Nanoeng. 2022. Vol. 8, № 1. P. 124.
3. Ai Y., Yang S. et al. // J. Phys. Appl. Phys. 2019. Vol. 52, № 21. P. 215103.
4. Qi H., Zhang H. et al. // Mater. Sci. Semicond. Process. 2025. Vol. 185. P. 108886.
5. Jadoon N. A. K., Puvanenthiram V. et al. // Inorganics. 2024. Vol. 12, № 10. P. 264.
6. Yang H., Sun J. et al. // J. Alloys Compd. 2024. Vol. 989. P. 174330.
7. Shayapov V. R., Bogoslovtseva A. L. et al. // Solid State Commun. 2025. Vol. 397. P. 115821.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту госзадания № FSUS-2024-0020. Измерения выполнены на приборах ЦКП «ВТАН» НГУ.*

# РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ ПО СОЗДАНИЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

В.А. Кузнецов<sup>1,2</sup>

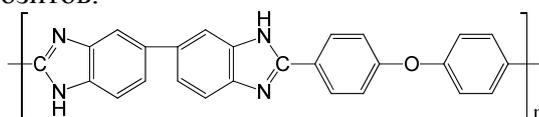
<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГТУ, просп. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630073

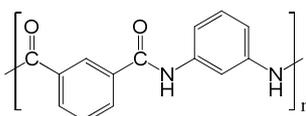
vitalii.a.kuznetsov@gmail.com

Появление новых углеродных наноматериалов и развитие коллоидной химии инициировали большое количество научных работ, посвященных разработке полимерных композиционных материалов, в том числе электропроводящих. Углеродные наноматериалы, такие как одностенные и многостенные углеродные нанотрубки, высокорасщепленный графит, малослойные графены, графеновые наночастицы и различные производные графена обеспечивают как улучшение физико-механических характеристик исходных полимеров, так и делают композиты на основе диэлектрических полимерных матриц электропроводящими. Принципиальные отличия физико-механических характеристик полимеров от традиционных для электроники полупроводников и металлов, а именно способность выдерживать большие растяжения и изгибы без разрушения, открывает для композитов на их основе перспективы в достаточно новой для электроники области — гибкой электронике. При этом новые получаемые фундаментальные знания о взаимодействии полимерных матриц с наноструктурированными наполнителями позволяют не только прогнозировать морфологию и структуру композиционных материалов на их основе, но и целенаправленно создавать материалы с заданными свойствами.

В рамках настоящей работы развиваются подходы по созданию электропроводящих полимерных композиционных материалов на основе теплостойких полимерных матриц полибензимидазола и ароматического полиамида (структуры использованных представителей полимеров приведены на рис. 1) с углеродными нанонаполнителями — одностенными и многостенными углеродными нанотрубками, малослойным графеном. Исследованы морфологические особенности разрабатываемых композитов с помощью методов исследования электронных транспортных свойств, спектроскопии оптического поглощения в области ультрафиолетового-видимого-ближнего ИК диапазонов, фотoluminesцентной спектроскопии, электронной микроскопии, а также тензорезистивных и термомеханических характеристик и молекулярного моделирования. Комплекс полученных экспериментальных данных позволил установить различия во взаимодействии полимеров с углеродными нанонаполнителями, а также влияние природы наполнителя на электрофизические и физико-механические свойства композитов.



поли-2,2'-*n*-оксидифенилен-5,5'-добензимидазол (ОПБИ)



поли-*m*-фенилен-изофталамид (МПА)

Рис. 1. Структуры использованных в рамках исследования представителей семейств полибензимидазолов (ОПБИ) и ароматических полиамидов (МПА).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10223, <https://rscf.ru/project/24-79-10223/>.

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МЕДНОЙ ФОЛЬГИ НА СТРУКТУРУ И ДЕФЕКТНОСТЬ CVD-ГРАФЕНА

М.А. Новиков<sup>1,2</sup>, К.М. Попов<sup>1</sup>, В.И. Сысоев<sup>1</sup>, А.В. Окотруб<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090

m.novikov4@g.nsu.ru

Графен – монослой атомов углерода – является перспективным материалом для создания чувствительных элементов газовых датчиков. Это обусловлено двумерной структурой графена и его уникальными физико-химическими свойствами, такими как большая удельная поверхность, высокая электропроводность, а также эффективная адсорбция молекул разнообразных газов. Важным фактором для применения графена в качестве газового сенсора является способ его синтеза, так как это значительно влияет на структуру и качество получаемого материала.

Среди множества способов синтеза графена, наиболее подходящим для применения в газовых датчиках является CVD-синтез, так как позволяет контролировать толщину пленки и ее однородность, а также получать пленки необходимого размера. Однако существует большое количество факторов, влияющих на свойства получаемого графена. К ним относятся условия предварительной обработки подложки, общее давление в системе, соотношение газов в реакционной смеси, температура и время синтеза. Настоящая работа посвящена изучению влияния предварительной обработки медной подложки на дефектность и структуру CVD-графена. Предварительная обработка медной фольги осуществлялась органическими растворителями и различными кислотами для очистки поверхности фольги от загрязнений и снижения ее шероховатости. Изучено влияние времени обработки и вида кислоты на шероховатость медной фольги. CVD-синтез графена включал в себя два этапа: отжиг медной фольги в атмосфере водорода и синтез из смеси метана и водорода при пониженном давлении при температуре 1050 °С. Проведено исследование влияния времени и температуры отжига медной фольги на ее шероховатость и размеры кристаллитов меди.

Для характеристики полученных материалов образцы графена были перенесены на кремниевые подложки с термически выращенным слоем оксида кремния (SiO<sub>2</sub>/Si). Структура и дефектность образцов графена исследовались с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Целостность пленок графена, перенесенных на целевую подложку, оценивалась с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии. Предварительная химическая обработка медной фольги и высокая температура отжига демонстрируют значительное снижение шероховатости меди и способствуют образованию графена с меньшим количеством дефектов. Полученные материалы имеют сопротивление 10-100 кОм/кв при комнатной температуре в зависимости от условий синтеза. Проведено исследование сенсорных свойств пленок графена. Материалы протестированы на циклическое воздействие акцепторных (диоксида азота) и донорных (аммиака) газов в интервале температур 25-180 °С, определены сенсорные характеристики пленок графена.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

А.Н. Колодин,<sup>1</sup> Е.А. Зайцева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, пр. Лаврентьева 3, Новосибирск 630090

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова 2, Новосибирск 630090  
e.zaitseva4@g.nsu.ru

Современный этап развития технологий, характеризующийся интенсивной цифровизацией, требует привлечения все новых перспективных подходов исследования магнитоактивных материалов с целью их дальнейшего применения в передовых устройствах микроэлектроники (а именно, системах хранения информации, квантовых компьютерах и т.д.). Одним из таких подходов является магнитно-силовая микроскопия (МСМ), позволяющая визуализировать магнитные домены с высоким пространственным разрешением, а также и их распределение вдоль аксиальной плоскости образца. Несмотря на высокую перспективность данного метода характеристики, потенциал его применения на данный момент остается мало изученным для ряда объектов исследования. Одними из таких объектов являются композитные покрытия и мембраны на основе смешанных органоzeлей Ag, железосодержащих материалов ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и т.п.) и т.д. Отсутствие подробной детализации функциональных свойств соответствующих двумерных материалов обусловлена сложным, гетерогенным характером их основы – прямым и обратным микроэмульсий наночастиц, стабилизированных с помощью ионных ПАВ.

В рамках данной работы проведена комплексная оценка возможностей МСМ при исследовании пленок и мембран на основе дисперсных систем наночастиц. В качестве модельных систем были выбраны органоzeли Ag и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , стабилизированные с помощью бис(2-этилгексил)сульфосукцинат натрия (АОТ) в декане. Проведена оптимизация условий измерения, а также исследована чувствительность метода к доменам различной дисперсности (от 100 нм до 20 мкм). Проведен критический анализ возможностей метода в качественном и количественной определении содержания железосодержащих частиц, а также поиске крупных дефектов в сложной доменной структуре. Результаты картирования магнитных свойств сопоставлены с данными независимых методов (например, метода Фарадея).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 24-73-00200.*

# ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ВАНАДИЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Д.М. Милюшин<sup>1,2</sup>, К.Е. Капогузов<sup>1,2</sup>, В. С. Тумашев<sup>1</sup>,  
Е. К. Багочус<sup>1</sup>, В. Н. Кичай<sup>3</sup>, Л. В. Яковкина<sup>3</sup>, С. В. Мутилин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИФП СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090

<sup>3</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 2, Новосибирск, 630090

d.milyushin@g.nsu.ru

Диоксид ванадия ( $\text{VO}_2$ ) – один из наиболее перспективных представителей оксидной электроники, который при температуре около  $68^\circ\text{C}$  претерпевает фазовый переход из низкотемпературной полупроводниковой фазы в высокотемпературную металлическую фазу со скачком сопротивления вплоть до  $10^5$  раз [1]. Это свойство делает  $\text{VO}_2$  подходящим для создания резистивных переключателей, в которых переключение из непроводящего состояния в проводящее инициируется за счет локального джоулева разогрева протекающим током. При таком переходе в пленке  $\text{VO}_2$  образуется токопроводящий филамент, что проявляется на электрической характеристике в виде резкого скачка тока [2]. Размеры филамента можно регулировать изменением внешних условий, а также свойств пленки  $\text{VO}_2$  и подложки, что позволяет получать аналоговые переключатели с несколькими стабильными состояниями. При этом, одной из важных задач на данный момент остаётся снижение энергии на переключение в таких структурах, что может быть достигнуто путем формирования микро- и наноструктур из сплошных поликристаллических пленок  $\text{VO}_2$ .

В данной работе рассматриваются резистивные переключения в двух видах структур – в структуре со сплошной пленкой  $\text{VO}_2$  и в мезоструктуре. Все структуры были сформированы из поликристаллических пленок  $\text{VO}_2$  толщиной 300 нм, синтезированных на подложках кремния (Si) с изолирующим слоем диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) методом химического осаждения из газовой фазы. Осаждение происходило в течение двух часов при температуре  $525^\circ\text{C}$ . Показано, что синтезированные пленки содержат  $\text{VO}_2$  M1 фазы и демонстрируют резкий скачок сопротивления на 3 порядка при температуре  $67\pm 2^\circ\text{C}$ . На синтезированных пленках с помощью оптической литографии и последующего напыления золота (Au) были изготовлены металлические контакты. Ширина контактов  $w$  варьировалась от 3 мкм до 70 мкм, чтобы определить влияние размера контактов на параметры резистивного переключения. Для формирования мезоструктуры пленка  $\text{VO}_2$  была локально удалена в плазме  $\text{SF}_6$  всюду, за исключением областей под контактами и промежутка между ними. Было показано, что формирование мезоструктуры из сплошной пленки позволяет уменьшить размеры области протекания тока на порядок, что сопровождается увеличением скачка тока с 40 до 400 раз. Установлено, что резистивные переключения в мезоструктуре инициируются на порядок меньшей мощностью, по сравнению с переключениями в сплошной пленке. Так, при ширине контактов 3 мкм величина пороговой мощности в мезоструктуре почти на порядок меньше, чем в сплошной  $\text{VO}_2$  пленке. Мы связываем такое снижение пороговой мощности значительным уменьшением области протекания тока, удалением отвода тепла в окружающую пленку и уменьшением площади золотых контактов.

Рассмотренные в работе мезоструктуры на основе поликристаллических пленок  $\text{VO}_2$  перспективны для применений в энергоэффективных и сверхбыстрых устройствах, сенсорах и нейроморфных системах.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

[1] Ke Y. et al. Small. 2018. Vol. 14, № 39. P. 1802025.

[2] Joushaghani A. et al. Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105, № 23. P. 231904.

# ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ $\text{Lu}_{3+x}\text{Fe}_{5-x}\text{O}_{12}$ : МОСVD-СИНТЕЗ И ВЗАИМОСВЯЗЬ СОСТАВ-СТРУКТУРА-СВОЙСТВА

Хафизов А.А.<sup>1</sup>, Гу Жосюань<sup>1</sup>, Маркелова М.Н.<sup>1</sup>, Волков Д.А.<sup>2</sup>,  
Габриелян Д.А.<sup>2</sup>, Сафин А.Р.<sup>2</sup>, Васильев А.Л.<sup>3</sup>, Кауль А.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В.Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

<sup>2</sup> ИРЭ имени В.А.Котельникова, 125009, Москва, Моховая, 11к7

<sup>3</sup> НИЦ «Курчатовский Институт», 123098, Москва, пл. Академика Курчатова, 1  
abduvosithafizov220@gmail.com

В последние годы редкоземельные феррогранаты ( $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ) привлекают к себе внимание как перспективные материалы спинтроники и магноники, среди них выделяется  $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , являющийся магнитным диэлектриком с высоким значением намагниченности насыщения. Эффективность тонких пленок  $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  в резонансных экспериментах ухудшается при наличии дефектов эпитаксиального роста и упругих напряжений. Целью данной работы является синтез, изучение структуры и резонансных свойств эпитаксиальных пленок  $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  на монокристалльных подложках  $\text{Gd}_3\text{Ga}_{5-x}\text{Al}_x\text{O}_{12}$  ( $x=0-2$ ).

Для эпитаксиального роста пленок  $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  нами использовано химическое осаждение из паров дипивалоилметанатов (МОСVD) с нитепротяжным питателем [1]. Состав и структуру пленок исследовали методами РФА, РСМА и ПЭМ поперечного среза. Ферримагнитный резонанс (ФМР) пленок измеряли на установке на основе векторного анализатора цепей [2].

Впервые установлено, что состав эпитаксиальных пленок феррограната  $\text{Lu}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  может значительно отличаться от стехиометрического в сторону обогащения редкоземельным компонентом, тогда как в автономных формах этого соединения (поликристаллических пленках, порошках и керамике) катионная нестехиометрия не обнаруживается. Показано, что нестехиометрическая фаза граната  $\text{Lu}_3(\text{Lu}_x\text{Fe}_{5-x})\text{O}_{12}$  формируется вследствие эпитаксии на изоструктурной подложке и возможности образования антиструктурных дефектов  $[\text{Lu}^{3+}_{\text{Fe}^{3+}}]_{\text{окт}}$ , при частичном занятии ионами  $\text{Lu}^{3+}$  не только додекаэдрических с-позиций, но и меньших по размеру октаэдрических а-позиций, в стехиометрическом составе занимаемых только ионами  $\text{Fe}^{3+}$ . Рассчитанная концентрация ионов  $\text{Lu}^{3+}$  в октаэдрических позициях феррограната может превышать 20%. Наряду с температурой роста пленки и соотношением прекурсоров  $\text{Fe}(\text{thd})_3/\text{Lu}(\text{thd})_3$  в газовой фазе, фактором, сильно влияющим на концентрацию антиструктурных дефектов, является рассогласование параметров ЭЯ на границе пленка / подложка,  $\epsilon$ , вызывающее упругие напряжения в эпитаксиальной пленке. При  $\epsilon > 0$  (параметр ЭЯ подложки больше параметра ЭЯ пленки) стремление к минимуму энергии интерфейса увеличивает сверхстехиометрическую концентрацию лютеция в форме дефектов  $[\text{Lu}^{3+}_{\text{Fe}^{3+}}]_{\text{окт}}$ , поскольку это приводит к значительному увеличению параметра ЭЯ пленки. Показано, что варьируя сверхстехиометрическую концентрацию лютеция в зависимости от состава и параметра используемой подложки, можно эффективно снижать рассогласование параметров ЭЯ на интерфейсе и тем самым минимизировать эпитаксиальные напряжения в пленках, что позволяет эффективно влиять на ширину и интенсивность линии ферромагнитного резонанса пленки, добиваясь наилучших результатов на монокристаллических гранатных подложках различного состава.

1. Кауль А. Р., Нигаард Р. Р. и др. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2021. № 3(23). С. 396-405.

2. Волков Д. А., Габриелян Д. и др. // Письма в ЖЭТФ 2024. № 5-6(119). С. 348-354.

## СИНТЕЗ СЛОЕВ BCN, В ТОМ ЧИСЛЕ В СОСТАВЕ КОМПОЗИТОВ, ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

С.В. Белая

ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
sveta@niic.nsc.ru

Как известно, в системе В–С–N могут образовываться бинарные и тройные соединения различного состава и структуры [1]. Так, например, карбид бора имеет структуру, основанную на икосаэдрах B<sub>12</sub> или B<sub>11</sub>C и цепях С–В–С, С–В–С, С–В–В или В⊗В (⊗ - вакансия), а гексагональный нитрид бора (h-BN) является структурным аналогом графита. Соотношение содержания элементов и локальное окружение атомов в пленках BC<sub>x</sub>N<sub>y</sub> можно изменять, применяя различные методы осаждения, а также варьируя условия синтеза. Это приводит к возможности получать материалы на основе BC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>, обладающие различными физико-химическими свойствами, например, от полуметаллов до диэлектриков.

Одним из широко используемых методов синтеза пленок BC<sub>x</sub>N<sub>y</sub> является химическое осаждение из паровой фазы (CVD). В данной работе сообщается о синтезе пленок BC<sub>x</sub>N<sub>y</sub> из смеси триметиламинборана (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N·BH<sub>3</sub> (ТМАБ), который содержит все три атома - В, N и С, и N<sub>2</sub> методами CVD при пониженном давлении (LPCVD) и плазмостимулированным (PECVD), при разных T<sub>ос</sub> (до 700 °С) и парциальных давлениях N<sub>2</sub> ((3÷12)·10<sup>-3</sup> Торр). Для характеристики пленок используются методы АСМ, СЭМ, ЭДС, РФЭС, РФА, ИК- и КРС и UV-Vis-NIR спектроскопии, а применение метода ОЭС позволяет приблизиться к пониманию корреляций между составом плазмы и осажденной фазы при изменении T<sub>ос</sub>.

Пленки аморфного BC<sub>x</sub> были получены методом LPCVD. Пленки h-BC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>, полученные методом PECVD, имеют структуру наностенок, представляющих собой пластинчатые кристаллы, состоящие из стопок гексагональных слоев с большой площадью поверхности. Размеры наностенок зависят от T<sub>ос</sub>, t<sub>синт</sub>, p(N<sub>2</sub>), параметров плазмы и др., и это качество может быть использовано для приложений в различных областях. Так, с изменением размеров наностенок h-BC<sub>x</sub>N<sub>y</sub> полученных при разных T<sub>ос</sub>, контактный угол смачивания водой пленок изменялся от 62 до 0°, в соответствии с моделью Венцеля-Дерягина, что свидетельствует о возможности получения гидрофильной - супергидрофильной поверхности. Такие покрытия, при их известной биологической совместимости могут быть предложены для испытаний в области биомедицинских приложений. Изменение размеров наностенок h-BC<sub>x</sub>N<sub>y</sub> путем варьирования t<sub>синт</sub> оказало влияние на долговечность работы резистивных переключателей на основе гетероструктуры VO<sub>2</sub>/h-BCN, предположительно за счет эффекта амортизации на жесткой подложке [2]. Гетероструктура h-BCN/BC<sub>x</sub>/FTO была испытана в качестве фотоанода в фото-электрокаталитическом процессе разложения воды. Синтезы производились в одном реакторе путем последовательного нанесения пленки BC<sub>x</sub> на подложку FTO/стекло методом LPCVD, затем пленки наностенок h-BCN методом PECVD, заданных составов, отвечающих требованиям электролитического процесса, где должны быть задействованы определенные электрофизические, оптические и морфологические характеристики. Изменяли толщину слоя BC<sub>x</sub>. Эффективность фотоэлектрического преобразования превзошла аналогичные характеристики, полученные для однослойных образцов BCN и BC<sub>x</sub>.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИНХ СО РАН.*

1. Nehate S.D., Saikumar A.K., et al. // Mater. Today Adv. 2020. V. 8. 100106.
2. Kapoguzov K.E., Mutilin S.V., et al. // Mater. Sci. Engin.: B. 2025. V. 321. 118511.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОФАЗНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЁВ ХЕМОРЕЗИСТИВНЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ

А.С. Мокрушин<sup>1</sup>, С.А. Дмитриева<sup>1,2</sup>, А.Р. Стройкова<sup>1,3</sup>,  
Н.П. Симоненко<sup>1</sup>, Е.П. Симоненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИОНХ РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, д. 1, стр. 51, Москва, 11999

<sup>3</sup>РХТУ им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, 125047

artyom.nano@gmail.com

Разработка новых методов формирования газочувствительных покрытий для хеморезистивных газовых сенсоров по-прежнему привлекает повышенное внимание со стороны научных и технических специалистов. Наиболее широкое использование нанесения рецепторных материалов получила толстоплёночная технология, которая позволяет получать эффективные и масштабируемые газовые сенсоры. Тонкоплёночная технология используется гораздо меньше из-за наличия некоторых нерешенных технологических проблем, в первую очередь связанных с отсутствием развитых способов локализации наносимого рецепторного материала.

В рамках данной работы рассматриваются различные рецепторные материалы, полученные методом аэрозольного газофазного осаждения (AACVD) и молекулярного наслаивания (ALD), в составе миниатюрных сенсорных элементов. Показана высокая эффективность применения газофазных процессов для получения чувствительных материалов с характеристиками, сопоставимыми аналогами, полученными с помощью толстоплёночной технологии.

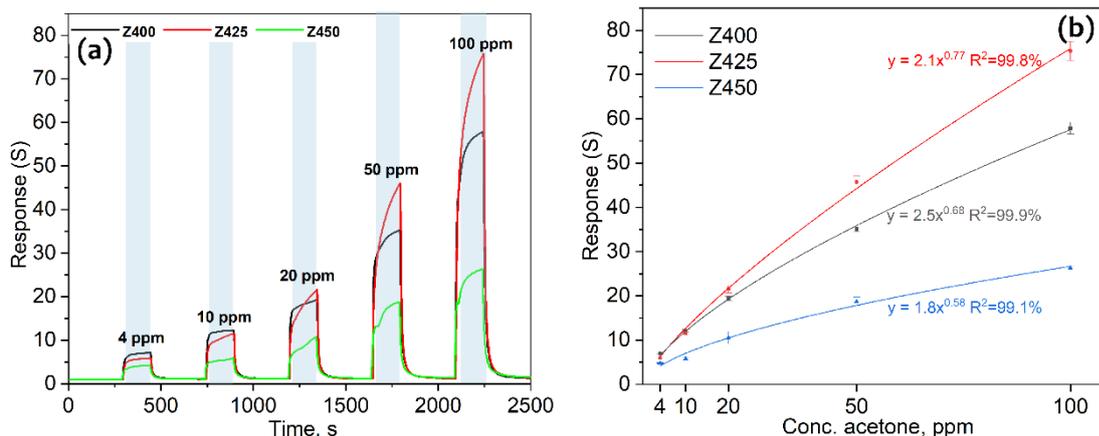


Рис. 1. Хемосенсорные свойства: отклики на 4-100 ppm ацетона (а) и зависимость отклика от концентрации (б) тонких плёнок ZnO, полученных методом AACVD

Произведено сопоставление двух методов формирования покрытий для газовых сенсоров: толстоплёночной и тонкоплёночной технология. Выделены основные преимущества и недостатки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-13-00254, <https://rscf.ru/project/24-13-00254/>.

1. A.S. Mokrushin, S.A. Dmitrieva, N.P. Simonenko, A.A. Averin, P.Y. Gorobtsov, A.I. Zviagina, E.P. Simonenko, «Influence of AACVD Temperature on the Microstructural and Gas Sensing Properties of ZnO Thin Films, Russian Journal of Inorganic Chemistry». 70 (2025) 1579–1592.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК НА ОСНОВЕ ZnO

Дмитриева С.А.<sup>1,2</sup>, Мокрушин А.С.<sup>2</sup>, Симоненко Н.П.<sup>2</sup>, Симоненко Е.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Ленинские Горы, д. 1, Москва, 119991

<sup>2</sup> ИОНХ РАН, Ленинский проспект, д. 31, Москва, 119071  
dmitrievasa-3@yandex.ru

Оксида цинка (ZnO) представляет собой полупроводник n-типа с шириной запрещенной зоны 3.37 эВ и энергией связи экситона 60 мэВ, что в совокупности с физическими и химическими свойствами определяет его широкое применение. Одним из перспективных направлений использования ZnO является разработка газочувствительных элементов.

В работе исследованы тонкие плёнки ZnO, полученные методом аэрозольного химического осаждения из газовой фазы (AACVD). Синтез плёнок ZnO осуществляли на специальной установке, состоящей из ультразвукового генератора аэрозоля, печи с проточной камерой и систему улавливания аэрозоля [1]. Варьируемым параметром являлась температура синтеза, которая составила от 350 до 500 °С с шагом 25 °С.

Согласно данным физико-химического анализа, полученный ZnO имеет кристаллическую структуру вюрцита со средним размером кристаллитов 26±4 нм. Исследование влияния температуры синтеза выявило ее ключевую роль в морфологии поверхности: при температурах синтеза от 400 до 450 °С образуются сплошные однородные пленки, вне этих условий — плёнки с островковой структурой.

Для оценки хемосенсорных свойств были выбраны образцы со сплошными плёнками ZnO, полученные при 400, 425 и 450 °С. Измерены отклики на ряд восстановительных и окислительных газов-аналитов (CO, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, этанол, ацетон и NO<sub>2</sub>) в интервале рабочих температур сенсора 150–350 °С. Показано, что наибольшая чувствительность достигается к летучим органическим соединениям при повышенной температуре работы сенсора. Обнаружена корреляция между величиной сенсорного отклика и развитостью поверхности: образцы с более высокой шероховатостью демонстрируют усиление сигнала. Дополнительно изучено влияние влажности газовой среды на параметры отклика при детектировании ацетона, что важно для применения сенсоров в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, в результате работы были установлены температурные режимы формирования тонких наноструктурированных плёнок ZnO и показана эффективность используемого метода AACVD для нанесения чувствительных слоёв газовых сенсоров.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН.*

1. Mokrushin A. S., Gorban, Y. M. et al. //Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2022. Т. 67, № 12. С. 2099-2107.

# ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ГАЗОФАЗНОГО НАСЫЩЕНИЯ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОВ

К.П. Бурдина<sup>1,2</sup>, А.Н. Аксенов<sup>1</sup>, А.В. Тюньков<sup>3</sup>,  
Ю.Г. Юшков<sup>3</sup>, О.В. Андреев<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>ПАО «Тюменские моторостроители», пл. В. Хуторянского, Тюмень, 625007 Россия

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000, Россия

<sup>3</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, 40, Томск, 634050, Россия

<sup>4</sup>Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, 625003, Россия

<sup>5</sup>Институт химии твердого тела УрО РАН, ул. Первомайская, 91, Екатеринбург, 620990, Россия

k.burdina@tmotor.ru

Высокотемпературная газовая коррозия деталей горячего тракта ГТД, таких как лопатки из жаропрочных никелевых сплавов (ЧС88ВИ, аналог Inconel 792), является критической проблемой. Окисление при рабочих температурах 800-900°C с образованием нестабильных оксидных пленок и возгонкой CrO<sub>3</sub> приводит к деградации материала и ограничивает ресурс [1].

Отечественные разработки сфокусированы на применении классических комбинированных покрытий с системой легирования MCrAlY (M=Co,Ni) с концентрацией алюминия порядка 14% масс., включающих внешние керамические термобарьерные покрытия (ТВС) на основе YSZ [2].

Зарубежные исследования активно развивают технологии диффузионных барьеров (напр., для сплавов MCNG, TMS-138) и комбинированных систем [3, 4]. Широко применяются передовые методы осаждения, такие как электронно-лучевое испарение и газофазные процессы (CVD, PVD). При этом в литературе отсутствуют данные о комплексной защите сплава ЧС88ВИ/Inconel 792 системой, сочетающей барьер Ni-W/Re, легированный Zr алюминидный слой и внешнее YSZ-покрытие.

На основе проанализированного опыта предложена комплексная система, синтезирующая лучшие практики:

-диффузионный барьерный подслой (Ni-W, Ni-Re), наносимый электрохимически, для подавления взаимной диффузии.

-легированный алюминидный слой (NiAl(Zr)), формируемый газофазным насыщением, для создания термостабильной  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> пленки.

-внешнее керамическое покрытие (YSZ), наносимое методом электронно-лучевого испарения, в качестве термобарьера.

Электрохимическое осаждение барьерных слоев проводится из оптимизированных электролитов. Насыщение поверхности алюминием проводили из газовой фазы методом порошкового алитирования. Для осаждения наноструктурированного YSZ покрытия применяется электронно-лучевой метод.

Новизна заключается в комбинации указанных методов для сплава ЧС88ВИ и в детальном исследовании роли легирования Zr в стабильности всей многослойной системы «барьер-алюминид-керамика».

Ключевая задача – анализ изменения элементного и фазового состава на границах слоев до и после термоциклирования. Для анализа использованы методы EDX, XRD. Разработка комбинированного покрытия, интегрирующая отечественные наработки по алюминидам и зарубежный опыт по барьерным слоям и ТВС, направлена на прорывное повышение ресурса лопаток ГТД. Реализация проекта позволит расширить возможности отечественных жаропрочных сплавов и снизить зависимость от импортных решений

1. А.В. Логунов. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. М.: Московские учебники, 2018. 592 с.

2. Н.В. Абраимов, В.В. Овчинников. Высокотемпературные материалы, покрытия и сварка в летательных аппаратах и двигателях. М.: Наука и технологии, 2023. 640 с.

3. E. Cavaletti, S. Naveos, S. Mercier. Surf. Coat. Technol. 2009. 204. 761–765.

4. T. Narita, K.Z. Thosin, L. Fengqun. Mater. Corrosion. 2005. 56, 923–929.

## **ОПЫТ МАСШТАБИРОВАНИЯ МЕЛКОСЕРИЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ LPCVD ОТ НИОКР ДО ЗАВОДА**

Г.С. Морозов  
*АО НИЦ "Инкомсистем", Казань*  
george.morozov@incomsystem.ru

Технология LPCVD incomsteel® применена для изменения характера взаимодействия нержавеющей стали с газами, содержащими микропримеси серосодержащих соединений, влаги, ртути, метанола.

Удалось за счет нанослоя аморфного кремния снизить адсорбцию этих соединений при концентрациях 1ppm и ниже.

Этот эффект помог приборостроителям России улучшить характеристики своих анализаторов (хроматографы, влагомеры, измерители концентрации ртути) в лаборатории и на потоке.

Технология прошла путь от лаборатории до промышленного производства за 5 лет.

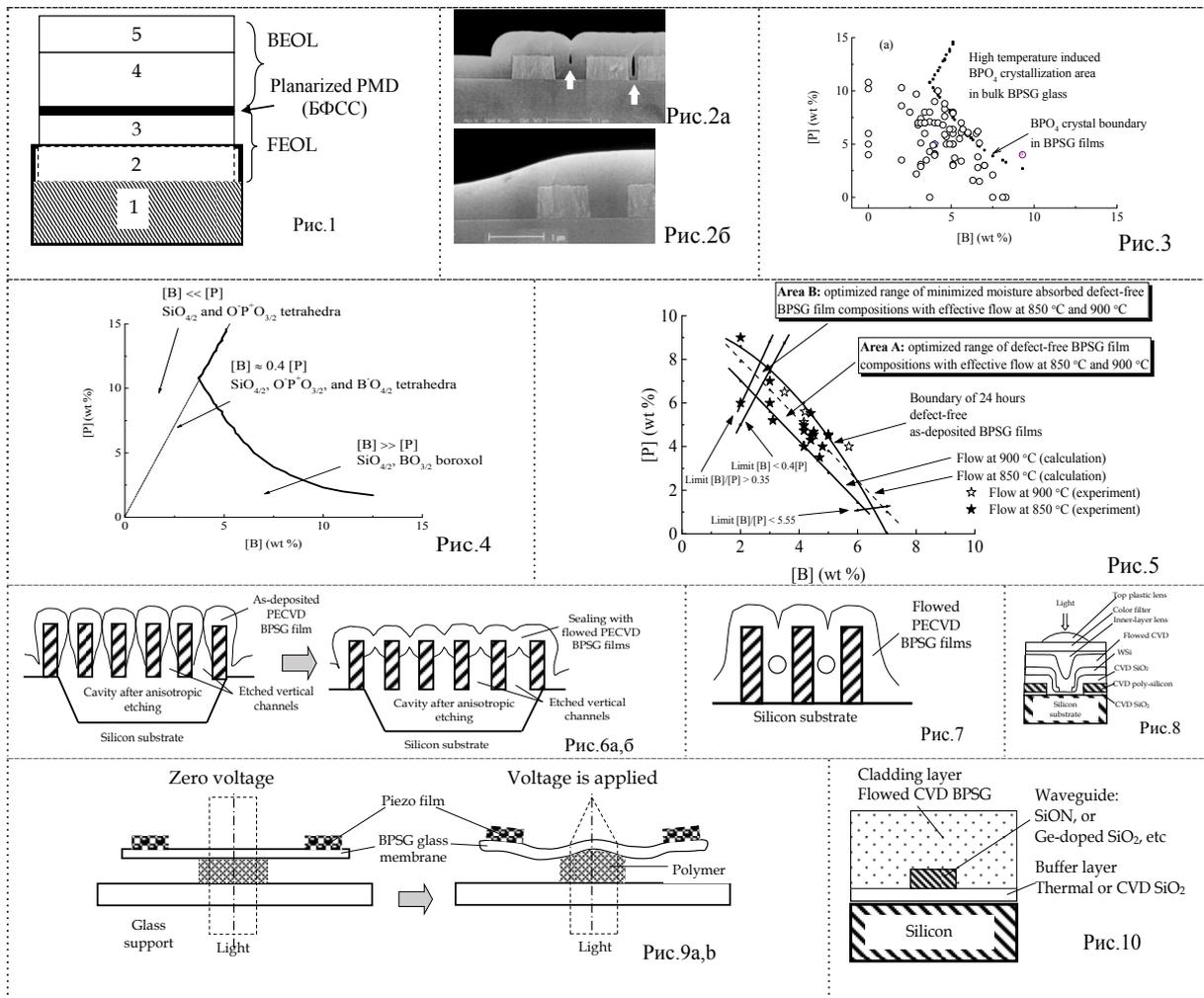
# CVD ПЛЕНКИ БОРОФОСФОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ИМС, МЭМС, МОЭМС - ОБЗОР

В.Ю. Васильев

НГТУ, просп. Карла Маркса, 20, Новосибирск

vasilev@corp.nstu.ru

Актуализирована информация о тонких пленках (ТП) борофосфоросиликатного стекла (БФСС,  $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ ), используемых в интегральных микросхемах (ИМС) от 3,0 мкм до 180 нм в качестве планаризируемого предметаллического диэлектрика (PMD) толщиной  $\sim 1$  мкм между FEOL и BEOL (рис.1). При нагревании до температур  $T_{\text{flow}}$  выше температур стеклования  $T_g$  для объемных стекол (ОС) происходит размягчение и оплавление БФСС с растеканием на рельефе ИМС (рис.2а,б). Отличие CVD пленок БФСС состоит в том, что их структура формируется непосредственно в ходе низкотемпературного осаждения из различных парогазовых компонентов при температуре  $T_d < T_g$ . Эффективность оплавления зависит от состава БФСС (ограничен кривой кристаллизации  $\text{BPO}_4$  в ОС, рис.3),  $T_{\text{flow}}$ , времени и условий нагревания. Обсуждается связь состава и структуры пленок и диапазон оптимальных бездефектных составов БФСС для ИМС (рис.4,5). Рассмотрены примеры использования оплавления БФСС в технологиях МЭМС, в т.ч. для герметизации полостей и скрытых каналов (рис.6а,б, рис.7). Прозрачные толстые пленки БФСС применяются в МОЭМС в качестве линз (рис.8), актюаторов (рис.9а,б), облицовки планарных световодов (рис.10).



# АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ БИМЕДИЦИНСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Д.В. Назаров<sup>1,2</sup>, Л.А. Козлова<sup>2</sup>, В.В. Вартиайнен<sup>2</sup>,  
А.П. Годун<sup>1</sup>, Н.М. Юдинцева<sup>3</sup>, М.Ю. Максимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7-9, Санкт-Петербург, 199034

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251

<sup>3</sup> Институт цитологии РАН, Тихорецкий пр. 4, Санкт-Петербург, 194064  
dennazar1@yandex.ru

Технология атомно-слоевого осаждения (АСО) в последние годы начала активно использоваться для создания покрытий на медицинских имплантах, формирования активных слоев и защитных покрытий биосенсоров, а также улучшения стабильности и пролонгации действия активных компонент лекарственных препаратов. Покрытия, полученные методом АСО, могут значительно улучшать и обеспечивать ряд новых функциональных свойств медицинских имплантов. В частности, оксидные покрытия могут приводить как к улучшению биоактивности, так и к созданию биоинертной поверхности, обеспечивать защиту от биокоррозии постоянных имплантов и регулировать скорость резорбции временных биоразлагаемых имплантов, а также обеспечивать бактерицидные свойства поверхности материала. Такое разнообразие функциональных свойств обусловлено в первую очередь возможностью регулировать состав и толщину покрытий с высокой точностью.

В данной работе приведены результаты исследований биомедицинских характеристик простых и смешанных оксидных покрытий, полученных методом АСО на поверхности важнейших металлических материалов, используемых при создании медицинских имплантов. В частности исследования *in vitro* и *in vivo* показали, что даже 20 нм покрытие оксида титана значительно улучшает биосовместимость ультрамелкозернистого титана, а в комбинации с предварительным химическим травлением ускоряет формирование кортикального слоя и остеоинтеграцию материала. В то же время комбинация нанопокровтий  $\text{TiO}_2$  и наночастиц серебра, полученных методом АСО, обеспечивает значительный антибактериальный эффект при этом сохраняя биосовместимость материала.

Проведенные исследования также показали, что покрытия смешанных оксидных систем  $\text{ZnO-TiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  значительно снижают скорость биокоррозии медицинского сплава нитинола и обеспечивают позитивный цитологический отклик остеобластоподобных и мезенхимальных клеток человека *in vitro*. При этом для покрытий  $\text{ZnO-TiO}_2$  с содержанием цинка менее 25% возможно совмещение антибактериальных свойств и сохранение биосовместимости.

Одним из наиболее перспективных направлений применения АСО в медицине является нанесение покрытий для замедления скорости биодеградации магниевых имплантов. В наших исследованиях было показано, что, варьируя состав оксидных покрытий можно регулировать скорость биокоррозии и биорезорбции магниевого сплава МА2-1пч в широком диапазоне и при этом сохранять биосовместимость материала *in vitro*. При этом было обнаружено, что для покрытий  $\text{TiO}_2$ , обладающих структурой анатаза, в отличие от аморфных покрытий, увеличение толщины приводит к снижению защитных свойств.

*Исследования проводились при финансовой поддержке РФФ (проект № 24-73-00115).*

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ОКСИДА НИКЕЛЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ $\text{NiCr}_2$ и $\text{O}_3$

И.С. Ежов, А.А. Попович, М.Ю. Максимов  
СПбПУ Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251  
iezhov1994@gmail.com

Оксид никеля ( $\text{NiO}$ ) широко применяется в различных областях благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. Одним из ключевых применений являются электрохромные устройства (ЭХУ), такие как «умные стекла», где  $\text{NiO}$  выступает в качестве активного слоя, обратимо изменяющего свою оптическую прозрачность под действием электрического тока. Подобные системы используются для термо- и светорегуляции в зданиях, в зеркалах заднего вида транспортных средств и иллюминаторах самолетов. Современные тенденции в разработке электрохромных материалов направлены на увеличение их эффективной поверхности за счёт создания сложной пористой и шероховатой морфологии. Перспективным подходом является создание высокоаспектных структур, которые улучшают ионный обмен и увеличивают площадь контакта, что в целом повышает производительность устройства. В этой связи важной задачей является нанесение конформного покрытия  $\text{NiO}$  на поверхность таких структур.

Наиболее перспективным методом является метод молекулярного наслаивания (МН), или atomic layer deposition (ALD, атомно-слоевое осаждение, АСО). В основе данного метода лежит последовательное формирование покрытия на поверхности твёрдофазной матрицы, которое осуществляется за счёт самоограничивающихся химических реакций между функциональными группами на поверхности подложки и поочередно подаваемыми в реакционную камеру газофазными реагентами. Такая саморегуляция процесса позволяет наносить равномерные покрытия на поверхность пористых материалов и высокоаспектных структур при этом температуры нанесения составляют не более  $300\text{ }^\circ\text{C}$ .

В данной работе был изучен процесс нанесения покрытий  $\text{NiO}$  методом МН с использованием реагентов – бис(циклопентадиенил) никель ( $\text{NiCr}_2$ ) и озон ( $\text{O}_3$ ). В качестве подложек в экспериментах по определению технологических параметров нанесения был использован монокристаллический кремний (100). Толщина покрытия измерялась с помощью спектральной эллипсометрии. Установлено, что в диапазоне температур реактора  $225\text{-}275\text{ }^\circ\text{C}$  средний прирост за цикл (СПЦ) является постоянным и составляет  $0,028\text{ нм/цикл}$  [1]. При варьировании времени напуска реагентов  $\text{NiCr}_2$  и  $\text{O}_3$  при температуре реактора  $250\text{ }^\circ\text{C}$  СПЦ является постоянным от 1 и от 4 секунд соответственно. Таким образом данные параметры соответствуют условиям реализации метода МН. Толщина покрытия изменяется линейно от 125 циклов, при этом до  $\approx 250$  циклов, наблюдается замедленное формирование покрытия. По результатам рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) наиболее интенсивным компонентом покрытия является  $\text{NiO}$ .

На поверхности подложки из нитевидных кристаллов оксида индия-олова (ИТО) было нанесено покрытие оксида никеля ( $\text{NiO}$ ). Исследование методом просвечивающей электронной микроскопии показало, что полученное покрытие толщиной  $\approx 20\text{ нм}$  является конформным. Изучение электрохромных свойств продемонстрировало, что наибольшее значение оптической модуляции (около 60 %) достигается при длине волны  $500\text{ нм}$ . Кроме того, исследуемый образец не показал существенной деградации в течение 1000 циклов переключений между контрастными оптическими состояниями.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-562 от 25.04.2024).*

[1] Ezhov I., Gorbov I., Vishniakov P. et al. // Vacuum. – 2025. – V. 242. – P. 114774.

## ИОНОХРОМИЗМ СПИРОПИРАНОВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

А.В. Чернышев, Ю.С. Реутова, Н.А. Волошин, А.В. Метелица  
НИИФОХ ЮФУ, просп. Стачки, 194/2, Ростов-на-Дону.  
avchernyshev@sfnedu.ru

Бистабильные молекулярные системы, способные существовать в нескольких термодинамически стабильных состояниях, переключение между которыми возможно при помощи внешнего воздействия, представляют большой интерес при разработке устройств фотоники, хемосенсорики и молекулярной электроники. Среди многообразия таких систем можно выделить фотохромные спиропираны (СПП), демонстрирующие резкое изменение окраски под воздействием света вследствие обратимой изомеризации между циклической (SP) и открытой мероцианиновой формами (MC). Помимо света, изомеризация СПП также чувствительна к ионам металлов за счет комплексообразования одной из форм, что обуславливает ионохромные свойства СПП. Традиционно ионохромизм СПП широко исследуется в растворах, и природа растворителя играет большую роль в эффективности образования комплексов.

Целью данной работы было установление возможности протекания ионохромной реакции СПП в газовой фазе. Объектами исследования были СПП 1-2 (рис.1) и летучие гексафторацетилацетонаты металлов  $M(hfac)_2$ ,  $M = Zn, Co, Mn$ ). Предварительное изучение в растворе показало, что только СПП 1, имеющий дополнительный донорный центр, образовывал умеренно прочные окрашенные комплексы с указанными дикетонатами [2]. Исследование проводилось на вакуумной установке, снабженной оптическими вводами для регистрации спектров поглощения кварцевых подложек в процессе термического напыления.

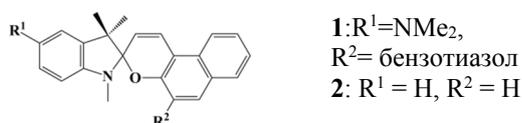


Рис. 1. Структура СПП.

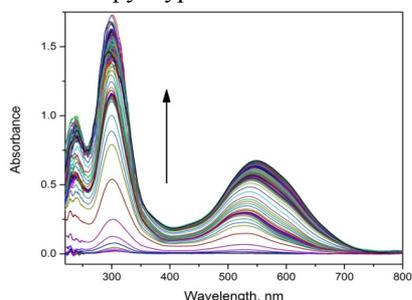


Рис. 2. Изменение спектра поглощения кварцевой подложки в процессе формирования пленки комплекса СПП 1 с  $Zn(hfac)_2$

монокристаллы. Данные РСА подтверждают состав комплекса 1:1 ( $1:M(hfac)_2$ ). При растворении в ацетоне пленки комплексов СПП 2 происходит их полная диссоциация.

Таким образом, впервые установлено протекание ионохромной реакции СПП с гексафторацетилацетонатами металлов в газовой фазе, в ходе которой происходит изомеризация спироциклической формы в мероцианиновую, стабилизированную в виде окрашенных комплексов.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 25-23-01299)*

[1] Molecular Switches, Eds Feringa B. L., Browne W. R., 2nd ed., Weinheim, Wiley, 2011, Vol. 1, 2, 809 p.

[2] Chernyshev A.V., Reutova Yu.S., Voloshin N.A., Metelitsa A.V., et al. // J. Mol. Struct. 2026. 1353. 144697.

# ТОНКИЕ ПЛЕНКИ КОМПЛЕКСОВ СПИРОПИРАНА И $\beta$ -ДИКЕТОНАТОВ МЕТАЛЛОВ: ГАЗОФАЗНЫЙ СИНТЕЗ И СВОЙСТВА

Ю.С. Реутова, А.В. Чернышев, Н.А. Волошин, А.В. Метелица  
ЮФУ, ул. Большая Садовая, 105/42, Ростов-на-Дону.  
reutova@sfnedu.ru

Работа посвящена исследованию комплексообразования спироафтопирана (СНП) (Рис. 1) с бис( $\beta$ -дикетонатами) металлов в газовой фазе. Spiropyrans – хромогенные органические соединения, которые под действием различных внешних стимулов (УФ-облучение, нагрев и др.) претерпевают изомеризацию из неокрашенной циклической формы в окрашенную мероцианиновую форму вследствие разрыва связи  $C_{\text{спиро}} - O$ . Мероцианиновая форма, содержащая фенолятный атом кислорода, способна координировать ионы металлов и образовывать с ними комплексы с характерными спектрами поглощения и люминесценции. Такие комплексы могут обладать фотохромными свойствами: облучение светом вызывает декомплексообразование, сопровождаемое изменением окраски или обесцвечиванием.

Впервые предложено получение комплексов СНП с бис-гексафторацетилацетонатами металлов  $M(\text{hfac})_2$  ( $M = \text{Zn}^{2+}, \text{Co}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Cd}^{2+}$ ) в газовой фазе методом термического соиспарения в вакууме. По отдельности эти соединения в процессе вакуумного напыления образуют бесцветные непрозрачные пленки, тогда как при их одновременном испарении наблюдается формирование яркоокрашенных аморфных пленок комплексов.

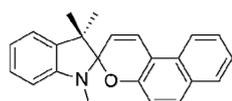


Рис. 1. Структура СНП.

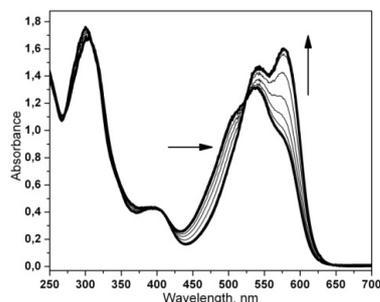


Рис. 2. Изменение в спектрах поглощения комплексов СНП +  $\text{Co}(\text{hfac})_2$  в присутствии паров MeOH.

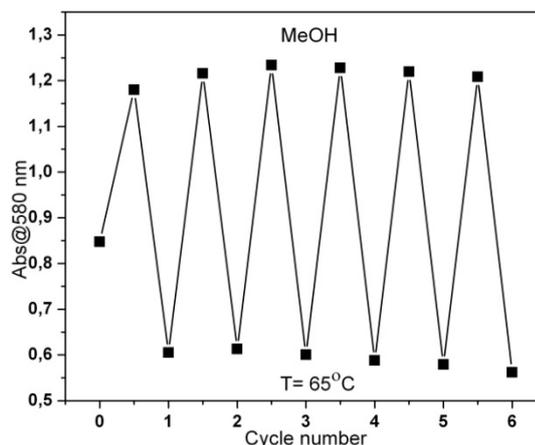


Рис. 3. Изменение в оптической плотности на максимуме поглощения комплекса СНП- $\text{Co}(\text{hfac})_2$  во время цикла окрашивания парами MeOH и нагрева при  $65^\circ\text{C}$ .

Полученные пленки комплексов СНП с  $\text{Zn}(\text{hfac})_2$  и  $\text{Cd}(\text{hfac})_2$  проявляют свойства отрицательного фотохромизма.

Также пленки комплексов СНП с  $\text{Co}(\text{hfac})_2$  и  $\text{Mn}(\text{hfac})_2$  демонстрируют вейпохромизм (Рис. 2). При действии на пленку комплекса паров полярных растворителей (ацетон, метанол, ацетонитрил, тетрагидрофуран) наблюдается резкое изменение ее окраски. В спектрах поглощения наблюдается увеличение оптической плотности на длине волны 572 нм, в то время как интенсивность на 500 нм падает. Была проведена оценка стабильности пленок после воздействия паров растворителей и последующего нагрева. После 6 циклов пленки сохраняют интенсивность окраски и способность реагировать в присутствии паров метанола, что делает их перспективными в качестве сенсоров (Рис. 3)

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 25-23-01299)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ В УСТАНОВКЕ ПРОТОЧНО-ВАКУУМНОГО ТИПА УМН-30

В.С. Балахнин<sup>1</sup>, Д.В. Володина<sup>1,2</sup>, Е.Д. Подкопаева<sup>1,2</sup>,  
З.С. Балыш<sup>1,2</sup>, С.К. Бочковский<sup>1,2</sup>, И.Б. Юдин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> ООО "Инжиниринговый центр молекулярного наслаивания", ул. Коммуны 67, лит. АР, Санкт-Петербург, 195030

<sup>2</sup> СПбГТИ(ТУ), Московский пр., д. 24-26/49 лит. А, Санкт-Петербург, 190013

<sup>3</sup> ИТ СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090  
bochkovsky.sk@ecml.ru

**Введение.** Метод молекулярного наслаивания (МН, ALD) находит широкое применение в различных отраслях промышленности. Преимущество метода заключается в обеспечении моноатомной равномерности толщины синтезируемого слоя по всей поверхности подложки, независимо от её формы. Однако для реализации данного свойства в промышленных реакторах требуется применение распределительных устройств и других конструктивных решений, обеспечивающих равномерное распределение газа по всему объему реактора.

**Цель.** Произвести оценку распределения газовых потоков в реакторе УМН-30 с и без обечайки, а также в варианте реактора с расширенной крышкой.

**Материалы и методы.** Расчет численной модели производился в пакете программ Ansys Fluent в ламинарной 3D постановке для нескольких типов реакторов. Производился расчет временной задачи с заданной функцией впрыска паров воды в постоянный поток азота при 250 °С.

**Результаты.** При сопоставлении моделей установлено совпадение линий тока газовых потоков над душем, однако, при варианте исполнения с расширенной крышкой было показано снижение максимальной скорости движения газового потока. В центральной плоскости сечения реактора без обечайки концентрация газа в пристеночной области ниже, чем у вариантов с обечайкой и с расширенной крышкой. Распределения плотности газа в нижней трети реактора без обечайки соответствует конусной форме, тогда как для реакторов с обечайкой и с расширенной крышкой – к эллиптической форме. Плотность потока паров в области распределительного устройства и в верхней трети реактора характеризуется неравномерностью. Отклонение от среднего значения достигает 30 % для реакторов с обечайкой и около 10 % для реактора без обечайки. Нестационарное течение смеси азота и водяного пара производилось в течение 3 с. Момент времени для сравнения основных результатов выбран 1,5 с - как пиковый момент для концентрации паров.

**Выводы.** В результате анализа численных моделей было показано, что исполнение реактора УМН-30 с обечайкой имеет наиболее оптимальное распределение газа в области размещения подложки. Исполнение с расширенной крышкой не оказало значимого влияния на плотность распределения газа по сравнению с реактором с обечайкой. Отсутствие обечайки приводит к неравномерному распределению газа, что может повлечь за собой протекание реакций, которые свойственны CVD процессам и неравномерному распределению синтезируемого покрытия на подложке.

# МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Р.А. ШУТИЛОВ<sup>1</sup>, В.В. Лукашов<sup>2</sup>, А.Г. Маликов<sup>3</sup>,  
М.А. Гулов<sup>3</sup>, А.Н. Аксенов<sup>4</sup>, И.К. Игуменов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
<sup>2</sup>ИТ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090  
<sup>3</sup>ИТПМ СО РАН, 1, Новосибирск, 630090  
<sup>4</sup>ОАО «Тюменские моторостроители», Тюмень  
shutilov@niic.nsc.ru

Аддитивные технологии определяют переход промышленности к шестому технологическому укладу, обеспечивают повышение производительности технологических процессов получения изделий с одновременным повышением коэффициента использования материалов и снижением массы конструкций [1]. Актуальной задачей современного авиационного материаловедения является повышение рабочих температур и прочностных характеристик сплавов. Одним из наиболее перспективных направлений повышения эксплуатационных параметров изделий является получение в аддитивных процессах дисперсноупрочненных материалов. Металлокерамические порошковые композиции на основе матриц жаропрочных никелевых сплавов, упрочненных дисперсными наноразмерными частицами тугоплавких соединений – карбидов, оксидов, боридов и т.д., имеют температуру плавления более 1400°C. Происходит упрочнение сплава за счет формирования мелкодисперсных частиц препятствующих движению дислокаций. Модифицирование порошков стало эффективным подходом к решению проблем, связанных с аддитивным производством металлических деталей.

Для модификации поверхности металлических микропорошков высокотемпературными оксидами металлов разработан специализированный МО CVD реактор. В качестве прекурсоров использованы летучие диваловоилметанаты (Y, Zr, Hf). Были исследованы процессы формирования покрытий на порошках типа Inconel™ диаметром 40-80 мкм.

Методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии было проведено исследование исходных и модифицированных порошков Inconel™. Показано, что на модифицированном образце наблюдается покрытие на основе оксидов металлов, что подтверждается данными ЭДС. Были измерены оптические параметры порошков. Процент конверсии прекурсора в материал покрытия больше 80%.

Модифицированный порошок Инконель 718 был протестирован в процессе лазерной наплавки. Лазерная наплавка производилась методом лазерной поверхностной наплавки LSC (Laser Surface Cladding) в защитной атмосфере аргона с использованием волоконного иттербиевого лазера IPG мощностью до 3 кВт и длиной волны 1.07 мкм, управляемого при помощи пятиосевого манипулятора Fanuc. Полученные образцы были исследованы методами рентгеновской дифракции, сканирующей микроскопии и энергодисперсионного анализа.

[1] Mathias, L.E.T., Pinotti, V.E., Batistão, B.F. et al. Metal powder as feedstock for laser-based additive manufacturing: From production to powder modification. Journal of Materials Research 39, 19–47 (2024). <https://doi.org/10.1557/s43578-023-01271-8>

## УГЛЕРОДНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ОПТИКИ

О.В. Седельникова<sup>1</sup>, Д.В. Городецкий<sup>1</sup>, О.Г. Поддубская<sup>2</sup>, А.В. Окотруб<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>ИЯП БГУ, ул. Бобруйская, 11, Минск, 220030

o.sedelnikova@gmail.com

Терагерцовый (ТГц) диапазон электромагнитного спектра долгое время именовался «ТГц провалом» (THz gap) из-за отсутствия эффективных технологий генерации, детектирования и управления ТГц излучением. Однако в последние годы, во многом благодаря прогрессу в материаловедении, этот «провал» активно заполняется. Ключевую роль сыграли исследования метаматериалов — искусственно созданных структур, чьи электромагнитные свойства определяются не столько химическим составом, сколько геометрией и периодичностью строения.

Особого внимания заслуживают поликристаллические алмазные плёнки (ПКАП), обладающие высокой прозрачностью в ТГц диапазоне, механической прочностью и высокой теплопроводностью. Важное преимущество ПКАП перед традиционным кремнием состоит в более низком показателе преломления, что открывает новые возможности для создания ТГц волноводных структур и элементов фокусировки.

В данном докладе представлены результаты исследования метаматериалов на основе свободных ПКАП, полученных методом газофазного осаждения из активированной СВЧ-разрядом смеси водорода и пентана. ПКАП подвергали воздействию импульсного наносекундного лазера (355 нм). При этом в зоне облучения происходило удаление алмазного материала и графитизация тонкого алмазного слоя, что позволило быстро и без предварительной подготовки образцов получить полностью углеродные материалы, демонстрирующие поляризационно-зависимые резонансные свойства при пропускании ТГц излучения. Впервые показано, что фотонные кристаллы на основе ПКАП с поверхностью, модифицированной лазерным излучением, могут выступать в качестве волноводных пластин, позволяя наблюдать резонансы, связанные с режимом распространения волноводных мод в ТГц диапазоне. В частности, для структур с толщиной волноводного слоя около 100 мкм и периодом решётки 400 мкм зафиксированы резонансные пики пропускания на частотах 0,44 ТГц и 0,69 ТГц для ТЕ-поляризованных волн и единственный пик на частоте 0,55 ТГц для ТМ-поляризованных волн. Экспериментально подтверждено, что уменьшение периода решётки вызывает красное смещение пиков пропускания, а добавление тонкого слоя диэлектрика позволяет подавлять одни резонансы и усиливать другие. Моделирование электромагнитных свойств исследованных метаструктур подтвердило природу резонанса волноводных мод в наблюдаемых спектральных особенностях.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 22-72-10097-П).*

## СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛЕНОК $\text{Hf}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$ И $\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

В.Р. Шаяпов, Е.А. Хижняк, М.С. Лебедев  
ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
shayapov@niic.nsc.ru

Смешанные оксиды  $\text{Hf}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  и  $\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  находят применения в качестве диэлектриков для микро и наноэлектроники, материалов для каталитических, оптических и сенсорных приложений. Характерной чертой смешанных оксидных материалов является возможность тонкой настройки ключевых функциональных свойств путем варьирования их состава. Метод атомно-слоевого осаждения (АСО) представляет собой наиболее подходящий инструмент для синтеза пленок смешанных оксидных систем, что обусловлено возможностью прецизионного контроля состава на уровне монослоев, а также получения пленок с высокой степенью однородности. В то же время, при осаждении методом АСО формируются аморфные пленки в диапазоне  $x$  от 0,2 до 0,8, что затрудняет их исследование структурными методами. Тем не менее, материалы, обладающие аморфным строением, сохраняют ближний порядок в расположении атомов и методы, чувствительные к ближнему порядку, могут быть использованы для выявления особенностей строения таких материалов. Методы оптической спектроскопии (ИК-спектроскопия, КРС) наиболее оптимальны для получения первичной информации о строении аморфных материалов.

Целью данной работы является спектроскопическое исследование тонких пленок оксидных систем  $\text{Hf}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$  и  $\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_2$ , полученных методом АСО при варьировании  $x$  от 0 до 1. Изменение состава пленок достигалось за счет изменения количества циклов осаждения прекурсоров гафния (циркония) и титана в одном суперцикле. Выполнены исследования пленок с применением методов ИК-спектроскопии отражения и пропускания, спектроскопии КРС в области фононных колебаний ( $1000\text{-}200\text{ см}^{-1}$ ). Для установления структуры пленок применялся метод рентгенофазового анализа (РФА). Интерпретация полученных закономерностей проведена с использованием данных об элементном и фазовом составе пленок, а также на основе имеющихся в литературе представлений.

Спектры КРС и ИК-спектры пропускания пленок содержат заметные полосы кристаллических фаз только при  $x=0$  и  $x=1$  ( $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ). Спектры КРС смешанных оксидных пленок обеих систем очень похожи и содержат две широкие полосы с максимумами около  $600$  и  $800\text{ см}^{-1}$ . С ростом концентрации титана полоса  $600\text{ см}^{-1}$  усиливается. Полосы вблизи  $800\text{ см}^{-1}$  интерпретируются разными авторами как колебания тетраэдров  $\text{HfO}_4$ ,  $\text{ZrO}_4$ ,  $\text{TiO}_4$  или элементов ближнего порядка оксидных систем  $\text{TiO}_n$ ,  $\text{ZrO}_n$  в аморфной матрице, а полосы около  $600\text{ см}^{-1}$  – как колебания октаэдров  $\text{TiO}_6$ . Отжиги при  $700\text{ °C}$  приводят к частичной кристаллизации пленок и появлению на спектрах фононных полос. В области  $x=0.67\text{-}0.75$  кристаллизация затруднена настолько, что отжиги при  $700$  и  $900\text{ °C}$  не позволили надежно установить фазовый состав пленок методом РФА. Лишь совместное применение РФА, ИК-спектроскопии и КРС помогло выявить сосуществование в пленках фаз  $\text{TiO}_2$  и орторомбического титаната ( $\text{HfTiO}_4$  или  $\text{ZrTiO}_4$ ).

ИК-спектры зеркального отражения при угле падения  $70^\circ$ , чувствительные к LO-фононам, проявляют полосы для всех составов и могут применяться для идентификации аморфных пленок.

*Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.*

## ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ ПРЕКУРСОРА НА СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА PECVD ПЛЕНОК СИСТЕМЫ Si–C–N–O–H

Е.Н. Ермакова, М.Л. Косинова

ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

ermakova@niic.nsc.ru

Ключевой задачей при создании следующих поколений СБИС является разработка технологии многоуровневой разводки с применением low-k диэлектриков и медной (и кобальтовой) металлизации. Значительной проблемой такой технологии является диффузия атомов металла в объем диэлектрика, приводящая к диэлектрическому пробое. Для её устранения требуется формирование барьерного слоя. Пленки семейства Si–C–N–O–H, включающие материалы  $\text{SiC}_x\text{N}_y\text{:H}$  и  $\text{SiC}_x\text{O}_y\text{:H}$ , зарекомендовали себя как эффективные диффузионно-барьерные слои и перспективные low-k диэлектрики, соответственно. Близость состава пленок приводит к хорошей совместимости этих материалов.  $\text{SiCN:H}$  также обладает высокой адгезией к меди, а этап его нанесения в ходе процесса PECVD легко интегрируется в линейку изготовления транзистора.

В данной работе пленки  $\text{SiCN:H}$  и  $\text{SiOC:H}$  синтезированы методом плазмостимулированного химического осаждения из газовой фазы (PECVD) из различных кремнийорганических соединений. Осаждение слоев  $\text{SiCN:H}$  проводили из гексаметилдисилазана, гексаметилдисилана, трис(триметилсилил)амин, тетраметилсилана. Для синтеза пленок  $\text{SiOC:H}$  использовали триметилсилилморфолин, винилметилдиэтоксисилан. Эксперименты проводили в «мягких» условиях (мощность ВЧ-излучения 10-80 Вт, температура осаждения 100-400°C) при варьировании типа плазмообразующего газа (реактивного или инертного). Исследованы свойства как индивидуальных слоев, так и структур  $\text{Si}(100)/\text{SiOC:H}/\text{SiCN:H}/\text{Cu}$ . Проведение синтезов в единой геометрии PECVD реактора с соблюдением и воспроизведением экспериментальных условий позволило определить влияние природы прекурсора на состав, строение и свойства получаемых пленок.

Установлены общие закономерности изменения состава газовой фазы и химического строения и состава осаждаемых слоев при варьировании основных параметров синтеза. Использование низких температур осаждения приводило к образованию «органических» пленок, строение которых практически повторяет строение исходного соединения. Проведение процессов при более высоких температурах синтеза позволило получить пленки, свободные от водородсодержащих групп, и содержащих фрагменты C-Si-N и C-Si-O, соответственно. Введение аммиака в реакционную смесь позволило при повышенных температурах (300-400°C) осаждения существенно снизить содержание углерода в пленках. На ряде примеров показана возможность управления химическим строением пленок путем выбора исходного соединения. Исследованы диэлектрические свойства пленок. Полученные пленки  $\text{SiCN:H}$  и  $\text{SiCO:H}$  в зависимости от состава обладали диэлектрической проницаемостью 2,5-4,7 и 2,4-4,4, соответственно. Полученные пленки имеют низкую пористость (до 3 %). Возможность пленок  $\text{SiCN:H}$  препятствовать диффузии Cu изучена методом ПЭМВР на примере сформированных структур  $\text{Si}(100)/\text{SiOC:H}/\text{SiCN:H}/\text{Cu}$  с различным составом слоев  $\text{SiOC:H}$  и  $\text{SiCN:H}$ .

*Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 23-79-00026, <https://rscf.ru/project/23-79-00026/> с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Национальный центр исследования катализаторов», ИК СО РАН, Новосибирск*

## БОРОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ – ПРЕКУРСОРЫ ДЛЯ CVD-СИНТЕЗА АМОРФНЫХ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК BN, B<sub>3</sub>CN И Si<sub>3</sub>CN

В.С. Суляева, М.Л. Косинова

ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

marina@niic.nsc.ru

Пленки на основе фаз системы В–С–N благодаря низкой плотности, термической и химической устойчивости, а также специфическим механическим, оптическим и электрическим характеристикам, представляют большой интерес для научных исследований и практических приложений. Изменение условий синтеза делает возможным широкое варьирование состава и структуры материала, что позволяет регулировать его функциональные характеристики. Этим объясняется непроходящая актуальность разработки новых процессов получения слоев ВС<sub>x</sub>N<sub>y</sub>(H) и SiB<sub>x</sub>C<sub>y</sub>N<sub>z</sub>(H).

Прогресс в этой области будет продемонстрирован на примере получения пленок ВС<sub>x</sub>N<sub>y</sub>(H) с использованием летучих борорганических соединений – боразина В<sub>3</sub>N<sub>3</sub>H<sub>6</sub> и его производных В<sub>3</sub>N<sub>3</sub>H<sub>3</sub>R<sub>3</sub>, алкиламинборанов R<sub>3</sub>N·BH<sub>3</sub> (R=Me, Et) и др., содержащих в себе все необходимые элементы для синтеза.

Использование борорганических соединений различного состава и строения, а также дополнительных газов (He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>) дает возможность значительно варьировать химический и фазовый состав и структуру пленок. При разработке процессов синтеза пленок:

- изучены температурные зависимости давления насыщенного пара борорганических соединений;
- проведено термодинамическое моделирование многокомпонентных систем Si–B–C–N–H–(O), используемых в процессах осаждения из газовой фазы;
- изучены кинетические закономерности роста пленок, синтезированных методами LPCVD и PECVD;
- исследованы химический, фазовый состав, морфология, структура, функциональные характеристики и их связи с условиями синтеза и с составом и структурой пленок.

Определены параметры процесса, влияющие на скорость осаждения, элементный состав, типы химических связей, микроструктуру и определены зависимости оптических (показатель преломления, коэффициент пропускания, ширина запрещенной зоны), диэлектрических (диэлектрическая проницаемость, напряжение пробоя) и механических (твердость, модуль Юнга, адгезия к подложке) характеристик от состава и химического строения пленок. Внимание уделено изучению поверхностных свойств пленок (морфология, шероховатость, краевой угол смачивания, свободная энергия поверхности). Определены условия формирования стабильных, твердых, оптически прозрачных, диэлектрических и гидрофильных покрытий.

*Работа проведена в рамках госзадания ИНХ СО РАН.*

## **СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ**

## ОПИСАНИЕ СВЯЗЕЙ МЕТАЛЛ-ЛИГАНД МЕТОДОМ EDA-NOCV

Р.Э. Афаунов<sup>1,2</sup>, И.В. Мирзаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090

r.afaunov@g.nsu.ru

Прекурсоры МОСVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) – это сложные координационные соединения, в которых природа связи между центральным металлом и лигандами определяет как термодинамическую стабильность, так и кинетику термического разложения. Понимание электронного строения этих связей критически важно для рационального дизайна новых прекурсоров с заданными свойствами.

Метод EDA-NOCV (Energy Decomposition Analysis with Natural Orbitals for Chemical Valence) был предложен в работе [1] и оказался удачным для описания сложных и разнообразных взаимодействий в системах с переходными металлами.

До недавнего времени метод был реализован только в коммерческих программах ADF [2] и, в модифицированном виде, Qchem [3]. Появившаяся недавно реализация в программном пакете ORCA [4] имеет ряд ограничений, которые не могут быть устранены, так как исходный код пакета закрыт и не позволяет модификацию метода и адаптацию его под специфические задачи.

В настоящей работе представлена реализация метода EDA-NOCV в рамках фреймворка PySCF [5]. Особенность нашей реализации в том, что она позволяет гибко задавать разбиение системы на произвольное число фрагментов и предоставляет возможность более подробно проанализировать вклады различных фрагментов и отдельных атомов.

*Работа выполнена в рамках госзадания 125021302132-4*

1. Mitoraj M., Michalak A. // J. Mol. Model. 2006. 13. № 2. 347.
2. Mitoraj M., Michalak A. and Ziegler T. // J. Chem. Theor. Comput. 2009. 5. 962.
3. Mao Y., Horn P.R. and Head-Gordon M. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2017. 19, № 8. 5944.
4. Sabando R.C., Riplinger C. et.al. // J. Chem. Theor. Comput. 2025. 21, № 16, 7920.
5. Sun Q., Zhang X. et.al. // J. Chem. Phys. 2020. 153, № 2. 1089.

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПЛАЗМО-СТИМУЛИРОВАННОГО АТОМНО-СЛОЕВОГО НАСЛОЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПЛЁНОК ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Г.З.Багаматов<sup>1,2</sup>, И.М.Абдулагатов<sup>1,2</sup>, А.И.Абдулагатов<sup>1</sup>, А.М.Максумова<sup>1,2</sup>,  
Н.А.Ашурбеков<sup>1</sup>, Г.Ш.Шабанович<sup>1</sup>, М.З.Закарьяева<sup>1,3</sup>.

<sup>1</sup> Дагестанский государственный университет, ул. М. Гаджиева, 43а, Махачкала

<sup>2</sup> Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики - филиал Объединённого института  
высоких температур РАН г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 39 "а"

<sup>3</sup> ФГБУН ДФИЦ РАН ул. М. Гаджиева, 45  
bagamatov0518@gmail.com

Атомно-слоевое наслоение (АСН) является одной из ключевых технологий в нанoeлектронике, оптике и защитных покрытиях, позволяющей получать высококачественные ультратонкие плёнки с атомарной точностью. Традиционное термическое АСН ограничено высокими температурами, от 150-200 °С что делает его непригодным для чувствительных подложек, таких как полимеры или органические материалы. Плазмо-стимулированное атомно-слоевое наплаивание (ПС-АСН) решает эту проблему, интегрируя активацию прекурсоров с помощью плазмы в процесс АСН, что значительно расширяет область применения данной технологии [1].

На основе детального анализа имеющихся в мире различных конфигураций установок ПС-АСН, нами разрабатывается модифицированная установка ПС-АСН с использованием полого катода как источника плазмы (см. рисунок), так как этот вариант позволяет добиться необходимой концентрации нейтральных радикалов при меньшей потребляемой мощности а также сводит загрязнение плёнки к минимуму.

С использованием программы SOLIDWORKS создана 3D модель собранной нами в лаборатории термической установки АСН (см. рисунок) и источника плазмы на основе полого катода. Полый катод представляет собой полый цилиндр со сквозными отверстиями, генерирующими плазму с высокой плотностью электронов, подключённый к ВЧ генератору. Соединение собранного АСН реактора и источника плазмы будет проведено с помощью переходника CF-KF для возможности упрощенной смены режима работы установки.

Также планируется серия экспериментов на COMSOL Multiphysics для определения наиболее оптимальных параметров работы при различных процессах и геометрии самого полого катода.

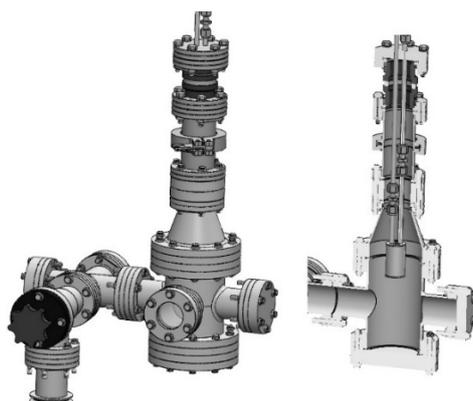


Рис. Общий вид установки и разрез с видом на положение полого катода

[1] Knoops H. et al. Status and prospects of plasma-assisted atomic layer deposition //Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2019. – Т. 37. – №. 3.

## МИКРОСТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ РОСТА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНОСИМЫХ МЕТОДОМ PVD

А.А. Бакунова, А.Л. Каменева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Комсомольский просп., 29, Пермь, 614990  
antonina.alexeevna@gmail.com, annkam789@mail.ru

Для прогнозирования свойств покрытий крайне важно изучение процессов структурообразования. Одним из способов является описание процесса через модели структурных зон. Целью данной статьи является анализ наиболее распространенных и часто используемых моделей структурных зон для изучения процесса структурообразования покрытий.

*Модель структурных зон Тортона* является классической схемой, которая описывает структуру пленок, полученных методом магнетронного распыления, и зависит от гомологической температуры ( $T_{\square}/T_{\text{пл}}$ ) и давления рабочего газа[1]. Даная модель разделена на четыре зоны: *зону 1* с пористыми столбчатыми кристаллами при низкой температуре, *переходную зону T* с более плотными, мелкозернистыми структурами, *зону 2* с плотной столбчатой структурой при активной диффузии поверхности и *зону 3* с равноосными плотными кристаллами при доминировании объемной диффузии на высоких температурах. Модель Тортона позволяет предсказывать изменения микротвердости, пористости, плотности и морфологию тонкопленочных покрытий в зависимости от условий осаждения.

*Модель Андерса* расширяет классическую структурную диаграмму Тортона, вводя три параметра роста[2]: обобщенную температуру  $T^*$ , нормированную энергию  $E^*$  и действительную толщину пленки  $t^*$ . Модель учитывает влияние ионного бомбардирования, процессов распыления и дефектообразования на  $t^*$ , что позволяет описывать рост, уплотнение и распыление до эффектов доминирующего травления. Модель Андерса более универсально описывает структурные зоны при энергетическом осаждении и качественно показывает, как условия плазмы и энергия потока определяют микроструктуру и морфологию пленок.

В статье Diana K. LaFollette[3] структура ультратонких пленок на начальных стадиях определяется *скоростью нуклеации* и *скоростью радиального роста островков*. Это позволяет определить, насколько быстро поверхность становится сплошной и гладкой. На основе моделирования Монте-Карло и статистики Пуассона показано, что минимальная толщина сплошной пленки зависит от числа зародышей: чем их больше, тем меньшая толщина необходима для коалесценции. Шероховатость растет пропорционально толщине, до того момента пока островки не объединятся в единый слой. Формирование плотных, гладких пленок без дефектов возможно при высокой нуклеационной активности поверхности и замедлении роста отдельных островков, которые можно получить с помощью плазменной обработки подложки.

1. Каменева А.Л. Эволюция представлений о структурных зонах поликристаллических наноструктурированных пленок, формируемых методами вакуумных технологий: моногр. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. 189 с.
2. Anders A. A structure zone diagram including plasma based deposition and ion etching // Thin Solid Films. 2010. Т. 518, № 19. С. 4087–4090.
3. LaFollette D.K., Canova K.L., Zhang Z.V., Abelson J.R. Coalescence of ultrathin films by atomic layer deposition or chemical vapor deposition: Models of the minimum thickness based on nucleation and growth rates // J. Vac. Sci. Technol. A. 2022. Т. 40, № 023403.

# CVD ОБОРУДОВАНИЕ С ВНУТРЕННЕЙ НАГРЕВАЕМОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ И ОХЛАЖДАЕМЫМИ СТЕНКАМИ ДЛЯ СИНТЕЗА ГРАФЕНА И ДРУГИХ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.П. Борисенко<sup>1,2</sup>, А.А. Галиуллин<sup>1,3,4</sup>, Д.А. Матиенко<sup>1,3,4</sup>, К.А. Досов<sup>1,5</sup>, М.Г. Рыбин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «РУСГРАФЕН», пр-кт Биологов, д. 15, Оболенск, 142279

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Каширское ш., 31, Москва, 115409

<sup>3</sup>НИУ ВШЭ, Покровский бульвар, 11, Москва, 109028

<sup>4</sup>ФИАН, Ленинский проспект, 53, Москва, 119991

<sup>5</sup>РХТУ, Мусская площадь, д. 9, стр. 1, Москва, 125047

dpborisenko@rusgraphene.ru

Из существующего уровня техники широко известно, что конструкция CVD-реакторов представляет собой ключевой элемент в обеспечении высокого качества, воспроизводимого и масштабируемого процесса получения графена и других двумерных материалов методом CVD. Эволюция конструкций CVD-реакторов от лабораторных установок до промышленных систем отражает растущие требования к производительности, однородности покрытия, энергоэффективности и совместимости с различными типами подложек. Современные реакторы проектируются с учётом сложной термодинамики, гидродинамики газовых потоков, а также необходимости минимизации дефектов в растущем материале. На сегодняшний день в научной и промышленной практике используются несколько принципиальных типов CVD-реакторов, каждый из которых ориентирован на определённые задачи: от получения высококачественного однослойного графена в лабораторных условиях до непрерывного промышленного производства.

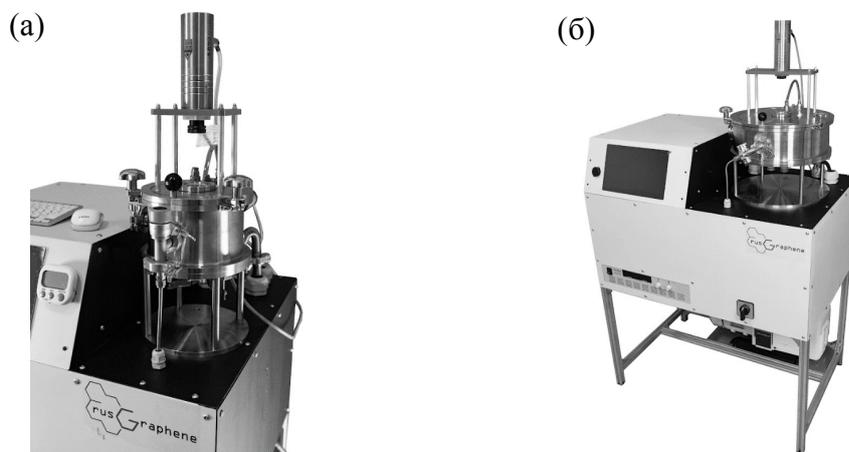


Рисунок 1. (а-б) Снимки CVD оборудования для синтеза графена и других двумерных материалов

Реактор для получения плёнок графена (Рисунок 1(а,б)) и других двумерных материалов методом CVD, содержащий герметичную вакуумную камеру, систему подачи и откачки газовых реагентов и конструкцию для размещения и нагрева подложки, характеризуется тем, что: вакуумная камера выполнена в виде замкнутого контура, обеспечивающего контролируемую циркуляцию газовой среды, при этом стенки камеры являются полыми, изготовлены из высокоуглеродистой нержавеющей стали и снабжены системой жидкостного охлаждения. Область для размещения и нагрева подложки выполнена стационарным образом и представляет собой сборную нагреваемую конструкцию, обеспечивающая фиксацию подложки и равномерный нагрев образцов площадью до 150 мм<sup>2</sup>. Реализованный CVD-реактор может быть применён как для лабораторных исследований, так и для промышленных задач за счёт осуществления точного контроля всех этапов нагрева и охлаждения с использованием встроенных в конструкцию термопар и внешнего пирометра.

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПЛЕНОК AG-AOT: МЕТОД «DIP-COATING» И МЕТОД CVD

В. В. Бочаров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, пр. Лаврентьева 3, Новосибирск 630090

<sup>2</sup>ИК СО РАН, пр. Лаврентьева 5, Новосибирск 630090

v.bocharov@alumni.nsu.ru

Композитные пленки на основе органоzeлей наночастиц Ag являются перспективным материалом для создания портативных сенсорных устройств с сигналом поверхностного плазмонного резонанса (ППР), которые могут быть широко использованы в медицине и продовольственной безопасности. Органоzeльные пленки демонстрируют стабильный ППР сигнал благодаря наличию избытка молекул ПАВ на поверхности, способствующего сохранению плазмонных свойств у наночастиц Ag. Вместе с тем наличие дифильных молекул существенно усложняет интерпретацию поверхностных свойств пленок на их основе (смачиваемости, шероховатости и т.д.), а также их энергетических характеристик (поверхностной энергии, модуля упругости, работы когезии и т.д.), что ставит под вопрос активное внедрение соответствующих композитов в технологии производства ППР сенсоров.

Существует множество методов получения композитных пленок на основе органоzeля наночастиц. В рамках данной работы будет рассмотрено два из них: метод «Dip-coating» и метод химического осаждения из газовой фазы (метод Chemical Vapor Deposition или метод CVD).

Метод «Dip-coating» позволяет получать пленки с однородными поверхностными и механическими свойствами. Образцы демонстрируют ППР сигнал, интенсивность которого можно варьировать в зависимости от количества погружений и материала подложки, а также обладают шероховатой поверхностью с крупными, широкими порами (значения среднеквадратичной шероховатости пленок и диаметра пор достигают 20 и 300 нм соответственно) и характеризуются сильными гидрофильными свойствами. При этом содержание Ag не превышает 5 м. %.

Метод химического осаждения из газовой фазы дает возможность получать высокочистые пленки. Формирование пленок происходит на подложках-мишенях при взаимодействии газообразных веществ – прекурсоров. В результате реакции могут образоваться побочные газообразные вещества, которые извлекаются потоком газа носителя из реактора. Этим методом получают тонкие пленки металлов, диэлектриков и полупроводников, выращивают монокристаллы и эпитаксиальные пленки [1]. Существуют различные виды CVD в зависимости от способа запуска химической реакции и условий протекания реакций, например, CVD при атмосферном, пониженном давлении или в вакууме, CVD с участием аэрозоля или с прямой инъекцией жидкости, плазменные методы CVD и т.д [2].

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 24-73-00200.*

1. Болдырев Ю. Я., Замотин К. Ю., Петухов Е. П. Моделирование процесса роста нанопленок методом химического осаждения из газовой фазы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2012. № 46. С. 19-30.
2. Pierson H.O. Handbook of Chemical Vapor Deposition. 2nd ed. N.Y.: Noyes Publications, 1999. 458 p.

# СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ Ag(I) с $\alpha,\alpha'$ -БИПИРИДИЛОМ И $\beta$ -ДИКЕТОНАТНЫМИ ЛИГАНДАМИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МОСVD

С.Е. Варваринская<sup>1,2</sup>, Е.С. Викулова<sup>1</sup>, И.Ю. Ильин<sup>1</sup>, Т.С. Сухих<sup>1</sup>, Д.П. Пищур<sup>1</sup>,

Н.А. Крючкова<sup>1</sup>, Н.Б. Морозова<sup>1,3</sup>, А.А. Жеравин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090

<sup>3</sup>«НМИЦ им. ак. Е.Н. Мешалкина» Минздрава России, ул. Речкуновская, 15, 630055

varvarinskayasofia@gmail.com

Благодаря антибактериальным свойствам серебра, его наночастицы и тонкие пленки находят широкое применение в медицине. Для получения таких материалов перспективен метод химического осаждения из газовой фазы (МОСVD), позволяющий равномерно покрывать объекты сложной формы и контролировать толщину пленок и размеры наночастиц. Широко используемыми в МОСVD прекурсорами являются  $\beta$ -дикетонаты металлов  $M(L)_n$  ( $L = RCOCHCOR'$ ), однако для  $M = Ag$  они имеют полимерные структуры и поэтому нелетучи. Для решения данной проблемы предложено введение «дополнительного» лиганда –  $\alpha,\alpha'$ -бипиридина (bipy). Интересно, что в зависимости от  $L$ , соответствующие комплексы на основе фторированных  $\beta$ -дикетонатов которые имеют биядерное (тип 1:  $R = R' = CF_3$ ,  $L = hfac$ ; тип 2:  $R = CF_3$ ,  $R' = CH_3$ ,  $L = tfac$ ) или моноядерное строение ( $R = C_3F_7$ ,  $R' = CH_3$ ,  $L = hfbac$ ) [1]. Данная работа посвящена дальнейшему исследованию влияния строения  $\beta$ -дикетонатного лиганда на структуру и свойства разнолигандных комплексов (РЛК) данного класса, а именно: объемной алкильной группы ( $R = CF_3$ :  $R' = ^tBu$ ,  $L = ptac$ ,  $R' = ^iPr$ ,  $L = ibtfac$ ), наращивания перфторированной цепи во фторированных ( $R' = CF_3$ :  $R = C_2F_5$ ,  $L = ofnac$ ;  $R = C_4F_9$ ,  $L = dfod$ ) и алкилированных ( $R = CH_3$ ,  $R' = C_2F_5$ ,  $L = rfbac$ ) производных.

Получены и изучены исходные  $\beta$ -дикетонаты  $[Ag_2(H_2O)_x(Et_2O)_{1-x}(L)_2]$  ( $L = ptac$ ,  $ofnac$ ,  $rfbac$ ,  $dfod$ ) и их аддукты с ацетонитрилом, что позволило разработать оригинальную методику для синтеза целевых РЛК (in situ «сборка» из  $Ag_2O$ ,  $NH_3$  и bipy в ацетонитриле). Для исследования новых РЛК применены методы <sup>1</sup>H-ЯМР и ИК-спектроскопии, РФА, РСА, ТГА и ДСК. По данным РСА, для РЛК  $[Ag(bipy)(L)]_n$  с перфторированными  $L$  ( $ofnac$ ,  $dfod$ ) реализуется структурный тип димера 1 (в изученных пределах: независимо от объема  $R$ ), тогда как введение алкильной группы способствует структурному разнообразию: димер типа 2 – в случае  $Me$ -группы ( $L = rfbac$ ), мономер – в случае объемной  $^tBu$ -группы ( $L = ptac$ ). Температуры плавления  $[Ag(bipy)(L)]_n$  (°C) увеличиваются в порядке:  $L = hfbac$  (87),  $dfod$  (90),  $rfbac$  (112),  $ofnac$  (115),  $ptac$  (135),  $tfac$  (145, разл.),  $hfac$  (149). Для РЛК с более фторированными  $L$  температуры плавления ниже, что может обусловлено большим количеством F...F контактов. По данным ТГА и ДСК, комплекс с  $L = ofnac$  обладает повышенной термостабильностью относительно аналогов, что перспективно для в МОСVD.

Методами квантовой химии (Orca 6.0.0, V3LYP-D3BJ/def2-TZVP) для каждого комплекса оптимизированы мономер и димеры двух типов в газовой фазе и с учетом растворителя, вычислены энергии димеризации и распределение зарядов. Анализ QTAIM показал основной вклад связей Ag-Ag и Ag-N в стабилизацию димеров типа 1, а зарядовое распределение – большой отрицательный заряд на метиновом атоме углерода для РЛК, образующих димер типа 2.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект РФФ № 25-15-00328).*

1. Vikulova E.S. et al. // J. Struct. Chem. 2024. N. 3(65). P. 489–503.

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ В ПЛАЗМЕ SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Е.А. Вячеславова<sup>1</sup>, Д.В. Мохов<sup>1</sup>, А.И. Баранов<sup>1</sup>, А.С. Гудовских<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова, ул. Хлопина, 8к3, лит А, Санкт-Петербург, 194021

<sup>2</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197022  
cate.viacheslavova@yandex.ru

Наноструктурированный черный кремний (*b*-Si) является модификацией поверхности кремния с чрезвычайно низкой отражательной способностью в широком диапазоне длин волн и углов падения излучения [1, 2]. Таким образом, *b*-Si может заменить использование пирамидального текстурирования и антибликовых покрытий в традиционной технологии солнечных панелей.

Черный кремний может быть получен разными методами [3, 4], в том числе плазмохимическим травлением при криогенной температуре [5]. Криогенное травление в газовой смеси SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> является разновидностью метода пассивации, основанного на конденсации соединения SiO<sub>x</sub>F<sub>y</sub> на поверхности кремния. При температурах ниже -100 °С пассивирующий слой SiO<sub>x</sub>F<sub>y</sub> проявляет химическую стабильность. Ионная бомбардировка избирательно удаляет этот слой с открытых участков, что позволяет продолжить травление с помощью F-радикалов. Такое взаимодействие между пассивацией и травлением приводит к самомаскирующемуся формированию случайных высокоаспектных кремниевых структур.

В данной работе представлены результаты исследования по формированию поверхности черного кремния методом криогенного травления (-120 °С) в индуктивно-связанной плазме SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>. Травление осуществлено на шлифованной и полированной стороне подложки, с предварительной химической обработкой подложек и без нее, и через органический слой фоторезиста PMGI. Процесс травления проведен с вариаций соотношения газовой смеси SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>/Ar, мощности смещения, мощности индуктивно-связанной плазмы и давления в камере.

На рисунке 1 показана схема процесса формирования черного кремния и РЭМ изображение наноструктур черного кремния.

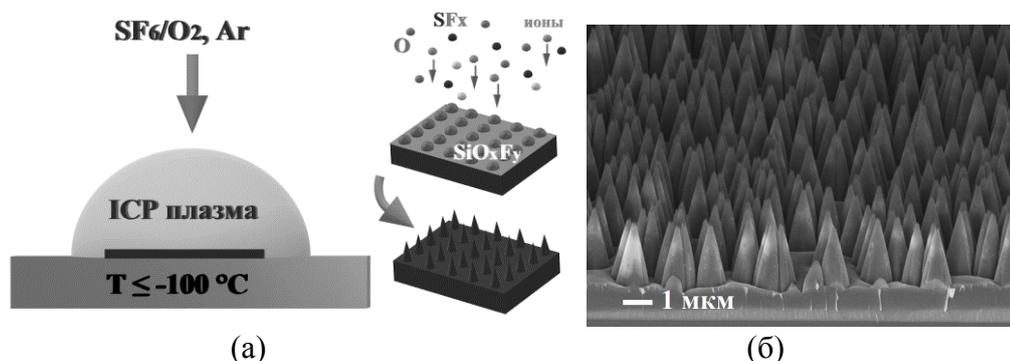


Рис. 1 – Схема процесса формирования черного кремния (а) и РЭМ изображение высокоаспектных кремниевых структур (б)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10275, <https://rscf.ru/project/24-79-10275/>.

1. Liu X., Coxon P. R., Peters M., et al. // Energy & Environmental Science. 2014. Vol. 7, no. 10. P. 3223–3263
2. Lv J., Zhang T., Zhang P., et. al. // Nanoscale Research Letters. 2018. Vol. 13, 110.
3. Arafat M.Y., Islam M.A., Mahmood A.W.B. // Sustainability. 2021. Vol.13, no. 19. 10766.
4. Jia H., Xie F., et al. // Advanced Photonics. 2025. Vol. 7, no. 3. 034004.
5. Vyacheslavova E.A., Morozov I.A., et. al. // ACS Omega. 2022. Vol. 7, no.7. P. 6053–6057.

# ВЛИЯНИЕ УДЛИНЕНИЯ (ПЕРФТОР)АЛКИЛЬНОЙ ЦЕПИ НА СТРОЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕТУЧИХ $\beta$ -ДИКЕТОНАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ИРИДИЯ(I) С 1,5-ЦИКЛООКТАДИЕНОМ

Д.В. Горина<sup>1,2</sup>, И.Ю. Ильин<sup>1</sup>, Т.С. Сухих<sup>1</sup>, И.А. Подоляко<sup>3,4</sup>, Е.С. Викулова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГПУ, ул. Виллюйская, 28, Новосибирск, 630126

<sup>3</sup>ИК СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 5, Новосибирск, 630090

<sup>4</sup>НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090

dgorina078@gmail.com

Иридийсодержащие материалы применяют в медицине благодаря уникальному сочетанию химической инертности, коррозионной стойкости и механической прочности. Они перспективны для основы улучшенных антибактериальных материалов (гетероструктуры типа Ag/Ir) и активных покрытий кардио- и нейростимуляторов. Для снижения энергозатрат при получении покрытий из этого тугоплавкого металла ( $T_{\text{пл.}} = 2466^\circ\text{C}$ ), эффективен метод химического осаждения из газовой фазы (MOCVD,  $T_{\text{осажд.}} \leq 600^\circ\text{C}$ ) [1]. Одним из наиболее синтетически доступных классов летучих прекурсоров выступают  $\beta$ -дикетонатные ( $L^- = R^1C(O)CHC(O)R^2$ ) комплексы иридия(I) с 1,5-циклооктадиеном (cod) [2]. Для управления их термическими свойствами необходимо понимать соответствующее влияние заместителей в лиганде. Ранее были изучены комплексы иридия с «базовыми» заместителями  $R^1$  и  $R^2$  (Me,  $\text{CF}_3$ , tBu, Ph) [2].

В настоящей работе изучено влияние удлинения (перфтор)алкильной цепи в L на строение и термические свойства комплексов  $[\text{Ir}(\text{cod})(L)]$ . Проведён синтез 4 новых соединений с  $L = \text{hd} / \text{tfhd}$  ( $R^1 = \text{C}_2\text{H}_5$ ,  $R^2 = \text{C}_2\text{H}_5 / \text{CF}_3$ ) и  $\text{ofhac} / \text{pfhac}$  ( $R^1 = \text{C}_2\text{F}_5$ ,  $R^2 = \text{CF}_3 / \text{CH}_3$ ). Они охарактеризованы методами ИК- и ЯМР,  $\text{CH}(\text{F})$ -анализа. По данным РСА, все комплексы имеют типичное молекулярное строение с бидентатной координацией лигандов (рис. 1а), что позволило рассмотреть влияние  $R^{1,2}$  на упаковку комплексов и их ближайших аналогов ( $L = \text{acac}$  ( $R^1 = R^2 = \text{CH}_3$ ),  $\text{hfac} / \text{tfac}$  ( $R^1 = \text{CF}_3$ ,  $R^2 = \text{CF}_3 / \text{CH}_3$ )) [1].

Термические свойства соединений изучены методом ТГА. Их температуры плавления находятся в диапазоне  $49\text{--}152^\circ\text{C}$ , увеличиваясь в порядке:  $L = \text{ofhac} < \text{hd} < \text{pfhac} < \text{tfhd} < \text{tfac} < \text{hfac} < \text{acac}$ . Максимальное снижение  $T_{\text{пл.}}$  наблюдается при удлинении перфторированной цепи ( $L = \text{ofhac}$ ,  $49^\circ\text{C}$ ) и введении двух  $\text{C}_2\text{H}_5$ -групп ( $L = \text{hd}$ ,  $61^\circ\text{C}$ ). Температуры 50% потери массы находятся в диапазоне  $166\text{--}243^\circ\text{C}$ , увеличиваясь в порядке:  $L = \text{ofhac} < \text{hfac} < \text{pfhac} < \text{tfhd} < \text{tfac} < \text{acac} < \text{hd}$  (рис. 1б,в). Введение одной  $\text{C}_2\text{F}_5$ - или  $\text{C}_2\text{H}_5$ -группы повышает летучесть ( $\Delta T = -15\text{--}20$  и  $-10^\circ\text{C}$ ), соответственно, а двух  $\text{C}_2\text{H}_5$ -групп – немного уменьшает ( $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ ). Последняя модификация увеличивает стабильность: степени разложения при  $L = \text{acac}$  и  $\text{hd}$  равны 22 и 14%, соответственно.

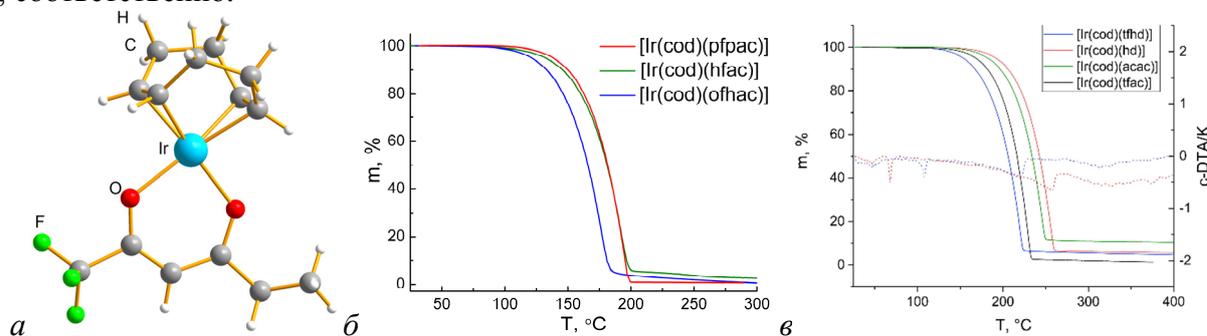


Рис. 1 Строение молекулы  $[\text{Ir}(\text{cod})(\text{tfhd})]$  (а) и результаты ТГА комплексов (б,в)

1. Vasilyev V.Y. et al. // RSC Adv. 2015. Vol. 5(41). P. 32034-32063.
2. Vikulova E.S. et al. // J. Coord. Chem. 2016. Vol. 69(15). P. 2281-2290.

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО И ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК

Д.В. Городецкий, О.В. Седельникова, Ю.В. Федосеева, Е.В. Лисица, М.А. Зимин,  
Р.С. Ерофеев, А.Д. Федоренко, А.В. Гусельников, А.В. Окотруб  
ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева 3, Новосибирск, Россия  
gordim2005@yandex.ru

Разработка материалов и устройств, способных детектировать электромагнитное излучение в широком диапазоне энергий является важной задачей. Была рассмотрена возможность использования поликристаллических алмазных пленок в качестве материала, на основе которого можно сформировать детектор, работающий в рентгеновском и видимом диапазоне частот.

Синтез поликристаллических алмазных пленок проводился методом плазмохимического осаждения из газовой фазы в микроволновом плазменном реакторе пониженного давления «Astex». Активация плазмы осуществлялась микроволновым генератором с частотой 2.45 ГГц, мощностью 3 кВт и при давлении газовой среды ~110 мбар. В качестве основного плазмообразующего газа использовался водород, поступающий со скоростью 500 мл/мин. В качестве углеродного предшественника подавались насыщенные пары пентана ( $C_5H_{12}$ ) при комнатной температуре, поток ~15 мл/мин. Синтезы алмазных пленок проводился на пластинах полированного кремния (100) размером 10x10 мм<sup>2</sup> и более и толщиной 0,45 мм. Для создания центров зародышеобразования алмазных кристаллов перед проведением синтеза на подложки наносилась дисперсия детонационных наноалмазов. После синтеза кремниевая подложка стравливалась в смеси кислот. В результате были получены свободные поликристаллические алмазные пленки толщиной ~100 мкм. Для изготовления детекторов излучения и создания электропроводящих контактов проводилось локальное облучение поверхности поликристаллической алмазной пленки сфокусированным ультрафиолетовым лазером. Лазерная обработка алмазных пленок приводит к формированию углубленных полос, сформированных из слоев  $sp^2$  углерода с проводимостью ~ 30000 См/м.

На поверхности алмазной пленки были сформированы два электрода в форме встречных периодических полосок, соединенных общими токопроводящими шинами. Расстояние между полосками составляло 500 мкм, ширина токопроводящего канала составила 200 мкм, расстояние между противоположными электродами составило 500 мкм. Фотоэлектрические свойства детекторов определялись по изменению тока, протекающего между противоположными шинами через диэлектрический разрыв, при облучении видимым светом и рентгеновским излучением. Результаты демонстрируют перспективность использования алмазных пленок с графитизированными проводящими электродами в качестве детекторов мягкого рентгеновского и оптического излучения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 22-72-10097-П)*

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ТЕРМИЧЕСКОГО АТОМНО-СЛОЕВОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

У.М. Дамыров<sup>1,2</sup>, С.Г. Гаджимурадов<sup>1</sup>, И.М. Абдулагатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дagecтанский государственный университет, Россия, Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а.

<sup>2</sup>ООО «АСТ ТЕХНОЛОГИИ ТРАВЛЕНИЯ»

umahan.damurov@gmail.com

Термическое атомно-слоевое травление (ТАСТ; англ. thermal atomic layer etching, T-ALE) представляет собой передовую технологию прецизионного удаления материалов с атомарной точностью, основанную на последовательных самоограничивающихся реакциях, включающих поверхностную химическую модификацию и удаление модифицированного слоя в виде летучих продуктов [1]. АСТ рассматривается как «обратный» процесс по отношению к атомно-слоевому осаждению [2] (АСО; atomic layer deposition, ALD), обеспечивая контролируемое удаление материала с шагом порядка одного атомного слоя за цикл.

В отличие от традиционных методов плазменного травления [3] (RIE, ICP-RIE), АСТ обеспечивает более высокую селективность, точность контроля глубины травления и снижение повреждений поверхности, что особенно важно при обработке дефект-чувствительных материалов, применяемых в современных многоуровневых структурах микро- и нанoeлектроники. Термический вариант АСТ реализует изотропное травление за счёт термохимических реакций и не требует использования плазмы, что делает его перспективным для задач, где важно боковое или равномерное удаление материала, например при формировании 3D-структур и встраивании активных элементов на боковых стенках [4].

Реализация термического АСТ осуществляется на основе модульной технологической платформы, включающей вакуумную реакторную камеру, систему подачи и дозирования газообразных реагентов, средства контроля давления и температурных режимов, а также программно-аппаратный комплекс управления циклическими процессами травления. Платформенный подход обеспечивает возможность адаптации химических циклов под различные классы материалов и реализации типовых механизмов термического АСТ, таких как фторирование с последующим лигандообменным удалением модифицированного слоя [5] и другие термохимические методы [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям, (Договор 1422ГССС27/109624)

1. Fischer A., Routzahn A., George S.M., Lill T. Thermal atomic layer etching: A review // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2021. Т. 39, № 3. Art. 030801.
2. George S.M. Mechanisms of Thermal Atomic Layer Etching // *Acc. Chem. Res.* 2020. Т. 53, № 6. С. 1151–1160.
3. Huff M. Recent advances in reactive ion etching and applications of high-aspect-ratio microfabrication // *Micromachines*. 2021. Т. 12, № 8. Art. 991.
4. Lee S., Lee G., Oh J., Kim Y., Park S. Novel atomic layer processes for semiconductor manufacturing: Area selective deposition, atomic layer annealing, and atomic layer etching // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2025. Т. 26. С. 2551–2571.
5. Fang C., Cao Y., Wu D., Li A. Thermal atomic layer etching: Mechanism, materials and prospects // *Prog. Nat. Sci.: Mater. Int.* 2018. Т. 28, № 6. С. 667–675.
6. Partridge J.L., Abdulagatov A.I., Sharma V., Murdzek J.A., Cavanagh A.S., George S.M. Thermal atomic layer etching of CoO using acetylacetone and ozone // *Appl. Surf. Sci.* 2023. Т. 638. Art. 157923.

# ПОВЕРХНОСТНАЯ ХИМИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$ С $\text{Zn}(\text{Et})_2$ И $\text{Al}(\text{Me})_3$ В ПРОЦЕССАХ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ

А.С. Дациев<sup>1,2</sup>, С.Г. Гаджимурадов<sup>1,2</sup>, С.И. Сулейманов<sup>1,2</sup>, У.М. Дамыров<sup>1,2</sup>,  
А.М. Максумова<sup>1,2</sup>, И.М. Абдулагатов<sup>1,2</sup>, А.И. Абдулагатов<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Дагестанский государственный университет, ул. М. Гаджиева, 43а, Махачкала, 367000, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45,  
Махачкала, 367025 Россия

<sup>3</sup>Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики — филиал Объединенного института  
высоких температур РАН, просп. Имама Шамиля, 39А, Махачкала, 367025 Россия

ahmed11131998@mail.ru

Смешанные оксидные плёнки  $\text{AlCr}_x\text{O}_y$  и  $\text{ZnCr}_x\text{O}_y$  востребованы как защитные (коррозия/окисление), функциональные сенсорные и каталитические покрытия;  $\text{Zn-Cr-O}$  системы дополнительно интересны как диэлектрики и фотокатализаторы ( $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$ ), а  $\text{Cr-O}$  слои — как элементы магнитоэлектрических/спинтронных структур и селективных солнечных абсорберов. Хромилхлорид (VI) ( $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$ ) — прекурсор для осаждения хромсодержащих оксидов, отличающийся высокой реакционной способностью и низкой температурой испарения. В данной работе исследуется химия поверхности маллоорганических групп на примере триметилалюминия (ТМА,  $\text{Al}(\text{Me})_3$ ) и диэтилцинка ( $\text{Zn}(\text{Et})_2$ ) с сильным окислителем  $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$  в процессах МН  $\text{MCr}_x\text{O}_y$  (где  $\text{M-Al, Zn}$ ). Ранее, система триметилалюминия и хромилхлорида была рассмотрены в работе [1], где проводилось исследование окислительно восстановительных реакций в рамках получения МН пленок.

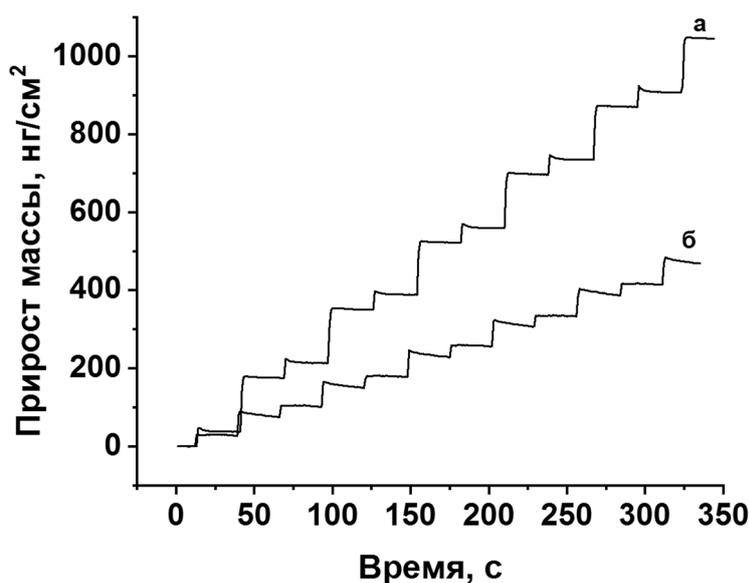


Рис. 1. Данные КПМ для процессов (ТМА, DEZ)/ $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$

На КПМ данных из рис.1, видно, что процесс воспроизводимый, со стабильным приростом за цикл. В 1 цикле DEZ/ $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$  (а) прирост составил  $174 \text{ нг/см}^2$ , а в 1 цикле процесса ТМА/ $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$  (б) прирост за цикл составил  $78 \text{ нг/см}^2$ ,

[1] Drozd V.E., Tulub A.A., Aleskovski V.B., Korol'kov D.V. Appl. Surf. Sci. 1994. 82/83. 587-590.

# ТЕРМИЧЕСКОЕ АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ СМЕШАННЫХ АЛЮМИНИЙ-МОЛИБДЕНОВЫХ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ $AlCl_3$ , $MoO_2Cl_2$ и $H_2O$

С.С. Етмищева, А.М. Максумова, И.М. Абдулагатов

Дагестанский государственный университет, ул. М. Гаджиева, д. 43-а, Махачкала, 367000  
sophi05@yandex.ru

Метод молекулярного наслаивания (МН), известный в зарубежной литературе как атомно-слоевое осаждение (АСО), изначально применялся для синтеза простых бинарных оксидов, таких как  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$ . По мере расширения области применения метода стало возможным получать с его помощью многокомпонентные, легированные и смешанные оксиды. Обычно это достигается объединением в суперцикл нескольких АСО-субциклов, соответствующих отдельным бинарным оксидам. В идеальном случае состав и скорость роста пленки должны подчиняться правилу смесей, то есть представлять линейную комбинацию вкладов от каждого бинарного процесса [1].

Однако экспериментальные исследования многокомпонентных пленок показывают, что реальный механизм роста оказывается значительно сложнее. Он определяется не только последовательностью субциклов, но и химией поверхности, реакционной способностью прекурсоров, а также побочными процессами, такими как неполный гидролиз, повторная адсорбция продуктов реакции или даже травление уже сформированных слоёв. В результате скорость роста и стехиометрия пленок часто существенно отклоняются от теоретически ожидаемых значений.

В настоящей работе смешанные оксидные пленки  $Al_xMo_yO_z$  были получены при температуре  $150^\circ C$  путём выполнения 100 суперциклов по схеме  $AlCl_3/H_2O/MoO_2Cl_2/H_2O$ . Анализ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) показал следующий атомный состав: Al 2p — 24,44 ат.%, Mo 3d — 2,01 ат.%, O 1s — 42,27 ат.%, Cl 2p — 1,93 ат.%, C 1s — 28,25 ат.%. Наличие хлора в пленке указывает на неполноту гидролиза прекурсоров или реадсорбцию побочных продуктов, в частности HCl. Загрязнение углеродом обусловлено контактами образцов с атмосферой в промежутке между осаждением и РФЭС-анализом.

Сравнение содержания алюминия и молибдена выявило значительный дисбаланс: относительная концентрация молибдена ( $\chi_{\text{РФЭС}} = 0,073$ ) оказалась намного ниже ожидаемой по составу суперцикла. Это отклонение, вероятно, связано с процессами химической конверсии или селективного травления, протекающими в ходе осаждения. Кроме того, в пленке обнаружены восстановленные формы молибдена ( $Mo^{5+}$ ); соотношение концентраций  $Mo^{5+}/Mo^{6+}$  составляет примерно 1:6,3.

Таким образом, рост Al–Mo–O пленок в данной системе сопровождается не только осаждением, но и реакциями восстановления и химической конверсии, что приводит к отклонению состава от прогнозов правила смесей, и подчеркивает необходимость учёта сложной поверхностной химии при разработке многокомпонентных АСО-процессов.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания FZNZ-2025-0003.*

1. Mackus A.J.M. et al. Chem. Mater. 2019. 31. 1142.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В CVD-СИНТЕЗИРОВАННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ МЕТОДАМИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

В.Б. Калинина<sup>1,2</sup>, К.Е. Капогузов<sup>1,2</sup>, И.А. Азаров<sup>1,2</sup>, А.Е. Гайдук<sup>2</sup>,

В.Н. Кичай<sup>3</sup>, Л.В. Яковкина<sup>3</sup>, С.В. Мутилин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup> ИФП СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090

<sup>3</sup> ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

v.kalinina1@g.nsu.ru

Диоксид ванадия ( $\text{VO}_2$ ) представляет собой материал с обратимым фазовым переходом полупроводник–металл. Этот переход может инициироваться различными внешними воздействиями: температурой (около  $68^\circ\text{C}$ ), электрическим током, оптическим излучением или механическими напряжениями [1]. В результате фазового перехода параметры  $\text{VO}_2$  изменяются скачкообразно: трансформируется кристаллическая решётка, электрическая проводимость, коэффициенты преломления и поглощения [2]. Так, на длине волны  $\approx 1000$  нм показатель преломления  $\text{VO}_2$  уменьшается со значения 2,5 до значения 1,5. Благодаря таким свойствам  $\text{VO}_2$  считается перспективным материалом для применения в модуляторах, оптических переключателях, фильтрах, адаптивных метаповерхностях, резонаторах, «умных» окнах и нейроморфных системах.

В данной работе исследуются оптические и электрооптические свойства тонких пленок  $\text{VO}_2$ , синтезированных методом газофазного осаждения (CVD) на подложках  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Было установлено, что синтезированные пленки состоят из, преимущественно,  $\text{VO}_2$  М-фазы и испытывают скачок сопротивления при фазовом переходе около  $10^3$  раз при температуре  $67^\circ\text{C}$ . Для исследования их оптических свойств были использованы методы спектральной эллипсометрии и микроэллипсометрии. На основе экспериментально полученных параметров  $\Psi$  и  $\Delta$ , были рассчитаны спектральные зависимости показателя преломления  $n(\lambda)$  и коэффициента поглощения  $k(\lambda)$  для металлической и полупроводниковой фаз  $\text{VO}_2$ . Показано, что наибольшая разница в значениях показателя преломления и поглощения наблюдается на длине волны 1100 нм. Прямое следствие этого изменения — перераспределение коэффициентов отражения  $R$ , пропускания  $T$  и поглощения  $A$ . Методом микроэллипсометрии были зафиксированы обратимые и воспроизводимые изменения оптических параметров  $\text{VO}_2$  при электрически-инициированном фазовом переходе. Так, параметр  $\Psi$  уменьшается на 2 градуса, а параметр  $\Delta$  растет на 3 градуса, что связано с изменением оптических коэффициентов  $\text{VO}_2$  при локальном фазовом переходе.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения  $\text{VO}_2$  в перестраиваемых оптических и электрооптических устройствах ближнего и среднего инфракрасного диапазонов.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

[1] Morin F.J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature. Phys. Rev. Lett. 1959. 3, 34.

[2] Ke Y. et al. Vanadium Dioxide: The Multistimuli Responsive Material and Its Applications. Small. 2018. 14, 1802025.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОКТАХЛОРЗАМЕЩЕННЫХ ФТАЛОЦИАНИНОВ МЕТАЛЛОВ КАК АКТИВНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ХЕМОРЕЗИСТИВНЫХ СЕНСОРОВ АММИАКА

Т.А. Камдина<sup>1,2</sup>, Д.В. Бонегардт<sup>1</sup>, Д.Д. Клямер<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, пр. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090  
t.kamdina@g.nsu.ru

Фталоцианины представляют собой класс макроциклических соединений, обладающих уникальными физико-химическими свойствами благодаря своей 18  $\pi$ -электронной ароматической системе [1]. Эти соединения отличаются высокой термостабильностью, химической инертностью и фотостабильностью. Их свойства могут быть дополнительно модифицированы за счет введения различных металлов в центральную полость макроцикла или функционализации периферийных позиций. Это делает фталоцианины металлов (ФМ) перспективными материалами для широкого спектра применений, включая органическую электронику, фотоэлектрические устройства и медицинские технологии. Одним из наиболее перспективных направлений является применение ФМ в качестве активных материалов для хеморезистивных сенсоров, особенно для детектирования токсичных газов, таких как аммиак ( $\text{NH}_3$ ) и сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) [2].

В представленной работе проведен синтез комплексов фталоцианинов металлов  $\text{MPcCl}_8$  ( $M = \text{Co}, \text{Zn}, \text{VO}$ ). Все полученные комплексы были охарактеризованы при помощи элементного анализа, колебательной (ИК- и КР-) спектроскопии, электронной спектроскопии поглощения, РФА и РСА, подтверждены их химический состав и чистота. Получены тонкие пленки октахлорзамещенных фталоцианинов металлов методами вакуумного термического осаждения из газовой фазы и центрифугирования растворов ФМ в дихлорметане. Пленки на основе полученных материалов были изучены в качестве активных слоев хеморезистивных сенсоров для детектирования аммиака (рис. 1а). Проведено исследование влияния природы центрального атома металла в фталоцианиновом макроцикле на величину сенсорного отклика (рис 1б) на аммиак в широком диапазоне концентраций.

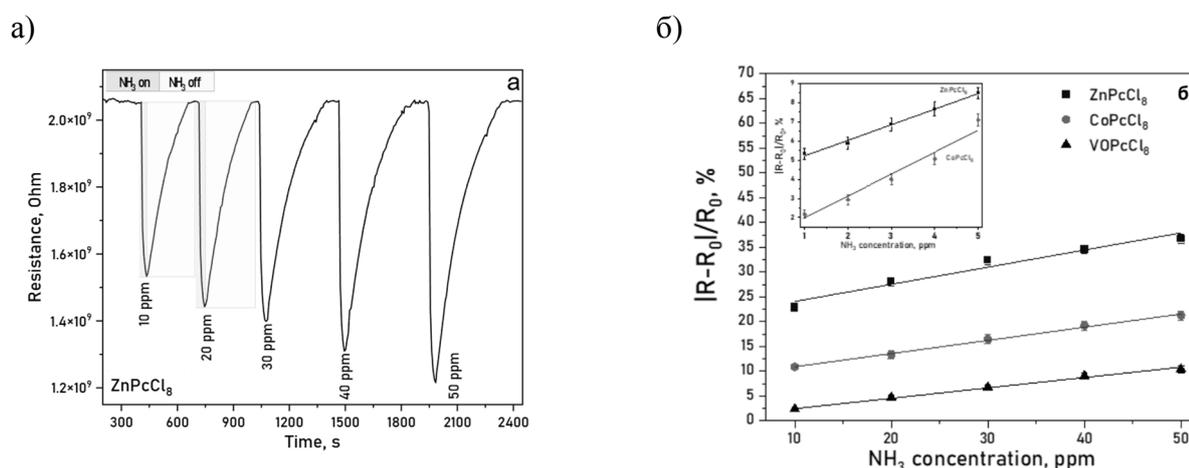


Рис. 1. (а) Сенсорный отклик пленки  $\text{ZnPcCl}_8$  на аммиак;  
(б) Сравнительный график сенсорных откликов  $\text{MPcCl}_8$  на аммиак

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ, проект 25-73-00134.

1. Reddy K. R. V., Keshavayya J., Seetharamappa J. Dyes and Pigments. 2003. 59. 237.
2. Bonégardt D. et al. Chemosensors. 2021. 9. 137.

# ПОЛУЧЕНИЕ ЛЕТУЧИХ КОМПЛЕКСОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПРИМЕРЕ $\beta$ -ДИКЕТОНАТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ КАЛИЯ

Д.В. Кочелаков<sup>1</sup>, Е.С. Викулова<sup>1</sup>, Н.В. Куратьева<sup>1</sup>, С.В. Сысоев<sup>1</sup>, Д.Б. Каюмова<sup>2</sup>,  
И.П. Малкерова<sup>2</sup>, А.С. Алиханян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИОХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>ИОХ РАН, ул. Ленинский просп., 31, Москва, 119991

kochelakov@niic.nsc.ru

В последние годы возрастает интерес к развитию химических газофазных процессов (МОСVD) для получения плёнок фторированных материалов, содержащих щелочные металлы (ЩМ), в особенности, калий. Например, галоидные перовскиты  $KMF_x$ ,  $x = 3, 4$  ( $M = s, p, d, f$ -металлы) востребованы в различных областях, тогда как допирование щелочными металлами эффективно при формировании эмиссионных материалов. Это стимулирует развитие химии соответствующих летучих производных – моно- и гетерометаллических.

Среди первого типа, основными летучими прекурсорами являются  $[K(^tBuO)]_4$  и  $[K(phen)(thd)]_2$  ( $phen = 1,10$ -фенантролин,  $thd =$  дипивалоилметанат), поэтому для получения фторидных плёнок из них необходим дополнительный источник фтора (обычно HF). В литературе есть сведения о летучести некоторых фторированных  $\beta$ -дикетонатов ЩМ, в том числе, калия [1], однако наши исследования показали, что этого недостаточно для применения в МОСVD. Поэтому для получения летучих монометаллических производных мы применили стратегию разнолигандного комплексообразования с эфиром 18-краун-6 (18C6). Синтезированы комплексы  $[K(18C6)(L)]$  для гексафтор-ацетилацетоната ( $L = hfac$ ), пивалоилтрифторацетоната ( $L = ptac$ ) и перфторацетил-трифторацетоната ( $L = ofnac$ ). Соединения исследованы методами элементного анализа, ИК-спектроскопии, РСА, РФА, ТГА. Все они являются мооядерными и формируют линейные цепочки за счет слабых контактов  $K...F$  ( $L = hfac/ofnac$ ) или  $K...H$  ( $L = ptac$ ) (рис. 1а). Летучесть комплекса с  $L = ptac$  показана в сублимационном тесте. Для аналога с  $L = hfac$ , тензиметрическое (эффузивный метод Кнудсена) и масс-спектро-метрическое исследование подтвердили конгруэнтную сублимацию ( $\Delta H^0_{(400K)} = 158 \pm 7$  кДж/моль,  $\Delta S^0_{(400K)} = 366 \pm 2$  Дж/(моль·К)). С использованием этого прекурсора впервые методом МОСVD показана возможность осаждения плёнок, содержащих KF (773К, газ-реагент  $O_2$ , Si(100)).

Среди гетерометаллических комплексов, наибольшее внимание уделяли тетраакис-производным  $K[M^{III}(L)_4]$  [2]. Наша работа сфокусирована на трис-производных: впервые получен комплекс с s-элементом  $K[Mg(hfac)_3]$ , его строение и термические свойства сравнены с аналогом для d-металла,  $K[Co(hfac)_3]$ . Соединения изучены методами элементного анализа, ИК, РСА, РФА, ТГА. Они являются цепочечными полимерами за счет контактов K-F с анионами (рис. 1б). Методом потока измерены  $p(T)$  зависимости давления насыщенных паров и получены термодинамические характеристики сублимации.

Представленные подходы могут быть адаптированы к другим тяжелым ЩМ.

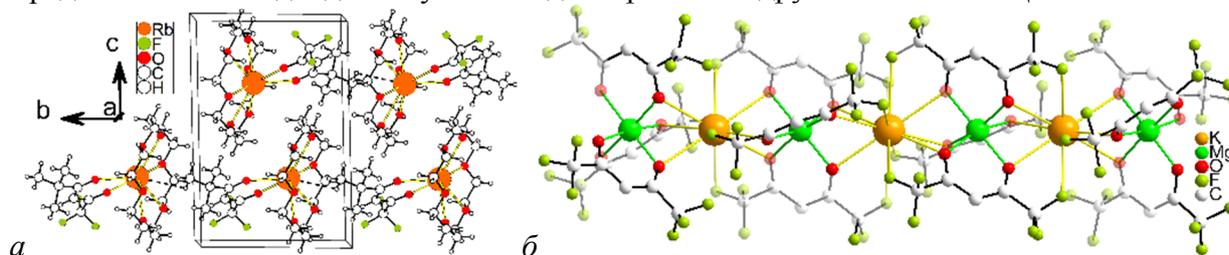


Рис. 1. Упаковка  $[K(18C6)(L)]$  (а) и строение цепочки  $K[Mg(hfac)_3]$  (б).

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект №24-79-10272).

1. Belcher R., Stephen, W. I. // J. Inorg. Nucl. 1969. V. 31, N. 1964. P. 625.
2. Saloutin V.I., Edilova, Y.O. et al // Molecules. 2022. V. 27. P.7894.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕТУЧИХ АЛКИЛАМИДОВ ГАФНИЯ (IV) – ПРЕКУРСОРОВ ДЛЯ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ

С.С. Крутских<sup>1,2</sup>, Е.С. Викулова<sup>1</sup>, Б.Ю. Савков<sup>1</sup>,

М.Ю. Афонин<sup>1</sup>, Д.П. Пищур<sup>1</sup>, Л.Н. Зеленина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup> НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090

krutskih.sophial@gmail.com

Оксид гафния ( $\text{HfO}_2$ ) – диэлектрик, широко использующийся в микроэлектронике благодаря электронным характеристикам, тугоплавкости и высокой стабильности. Соответствующие пленки получают методом атомно-слоевого осаждения (АСО), основанном на контролируемых поверхностных реакциях паров соединения гафния (прекурсора), что позволяет прецизионно контролировать толщину и качество материала на подложках сложной геометрии. Наиболее эффективная оптимизация условий парообразования и массопереноса в АСО возможна на основании количественных данных о термических свойствах прекурсоров: области температур стабильности, температурной зависимости давления пара. Однако для АСО-прекурсоров гафния эти сведения практически не представлены, что во многом обусловлено сложностью их изучения вследствие чрезвычайной чувствительности к влаге/воздуху.

Настоящая работа сфокусирована на термодинамическом исследовании наиболее востребованных прекурсоров гафния: алкиламидных производных *тетраakis*-(диметиламида)гафний (ТДМАН) **1** и *тетраakis*(этилметиламида)гафний (ТЕМАН) **2**. В качестве альтернативы синтезированы циклопентадиенильные производные ТДМАН –  $\text{SrHf}(\text{NMe}_2)_3$  **1'** и  $\text{Sr}_2\text{Hf}(\text{NMe}_2)_2$  **1''**, причем для **1'** также проведено термодинамическое исследование. Процесс испарения **1**, **1'**, **2** изучали методом статической тензиметрии с мембранным нуль-манометром, а процесс плавления **1**, **1'**, **1''**, **2** – методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). Загрузку проводили в аргоновом боксе. Для исследований **1**, **2** использовали свежеперегнанные нами коммерческие образцы (ООО ДАЛХИМ), соединения **1'** и **1''** синтезировали по реакции замещения алкиламина в **1** мономеризованным  $\text{HfSr}$ .

Для **1**, **1'**, **2** проведено несколько серий измерения давления насыщенного и ненасыщенного пара в широком интервале температур (314–434 К). Предельная ошибка измерения давления составляла 0.3 Торр, температуры – 0.5 К. Экспериментальные данные по насыщенному пару ( $p(T)$ ) обработаны методом наименьших квадратов с целевой функцией, основанной на принципе максимального правдоподобия, и получены значения термодинамических характеристик процессов испарения ( $\Delta_{\text{исп}}H^\circ_{T_{\text{ср}}}$ ,  $\Delta_{\text{исп}}S^\circ_{T_{\text{ср}}}$ ) **1**, **1'**, **2**.

Молекулярная масса газовой фазы **1**, рассчитанная из данных по давлению ненасыщенного пара однозначно указывает на переход **1** в газовую фазу в виде димера (это согласуется со строением молекулы в кристаллах [1]), который при более высокой температуре диссоциирует до мономера. При дальнейшем нагревании выше  $T = 431$  К наблюдается необратимое увеличение давления (уменьшение молекулярного веса мономера), что подтверждает начало разложения. Данные по ненасыщенному пару **1** ниже 431 К позволили получить численное значение константы диссоциации **1** в газовой фазе, а также энтальпию и энтропию этого процесса.

1. P.A. Williams, et al. // Chem. Vapor Depos. 2003. Vol. 9, Nr 6. P. 309–314.

## ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ СТРУКТУРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОРИСТОГО УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА, ДОПИРОВАННОГО АЗОТОМ, И ЕГО ПОВЕДЕНИЕМ В ЛИТИЙ-ИОННОМ КОНДЕНСАТОРЕ

Е.В. Лисица, А.Д. Панфилова, Ю.В. Федосеева,  
А.А. Загузина, А.В. Окотруб, Л.Г. Булушева  
ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
shlyakhovaev@niic.nsc.ru

Разработка новых эффективных систем накопления и хранения электрической энергии имеет важное значение для развития современных технологий. Комбинирование высокой мощности энергии и длительного периода эксплуатации, характерной для суперконденсатора, и высокой плотности энергии и низкой саморазрядки при хранении, характерной для литий-ионных аккумуляторов, привело к новым перспективным электрохимическим устройствами хранения энергии - литий-ионные конденсаторы (ЛИК). В качестве электродного материала ЛИК предлагается использовать пористый углеродный материал (ПУМ), представляющий собой трехмерную углеродную матрицу из тонкослойных графитоподобных слоев с иерархической системой пор.

В данной работе были получены углеродные и азотсодержащие ПУМ методом CVD из этанола и/или ацетонитрила при температуре 650 °С. Темплатные наночастицы были сформированы путем термолиза тартрата кальция, допированного железом, составом,  $\text{L-Fe}_{0.03}\text{Ca}_{0.97}\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$  в атмосфере этанола, ацетонитрила или их смеси (1:1 по объему). Морфология, состав и строение полученных ПУМ были изучены методами растровой электронной микроскопии, спектроскопией комбинационного рассеяния света и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Методом низкотемпературной адсорбции азота была определена удельная площадь поверхности образцов, которая составляет 874–1140 м<sup>2</sup>/г. РФЭС исследования показали, что концентрация азота на поверхности азотдопированных образцов составляет около 1–5 ат. %. Из полученных ПУМ изготавливались рабочие электроды, из которых потом собирались электрохимические ячейки ЛИК. В качестве противоположного электрода использовали металлический литий, а в качестве электролита – 1 М раствор перхлората лития в смеси органических растворителей. Тестирование рабочих катодов проводилось в диапазоне напряжений от 1.8 до 4.0 В отн. Li/Li<sup>+</sup> в гальваностатическом режиме при плотностях тока 0.05–1 А/г и потенциостатическом режиме при скоростях развертки 0.1–1 мВ/с. Электродный материал, основанный на ПУМ из ацетонитрила, продемонстрировал наиболее высокие емкостные характеристики по сравнению с материалом из этанола, что было связано с присутствием активных азотсодержащих функциональных групп и улучшенными транспортными свойствами. Образец, показавший наилучшую производительность при н.у., был протестирован при низких температурах работы вплоть до –20 °С.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №25-23-00921*

## ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ СЛОЕВ $\text{MoO}_x$ ДЛЯ ПАССИВАЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ

А.А. Максимова<sup>1,2</sup>, Е.А. Вячеславова<sup>1</sup>, А.И. Баранов<sup>1</sup>, А.В. Уваров<sup>1</sup>, О.П. Михайлов<sup>1</sup>,  
В.А. Поздеев<sup>1,2</sup>, Э.Я. Ярчук<sup>1,2</sup>, А.С. Гудовских<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СПбАУ РАН им.Ж.И.Алферова, ул. Хлопина, 8, Санкт-Петербург, 194021

<sup>2</sup>СПбГЭТУ ЛЭТИ, ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197022

maksimova\_alina@spbau.ru

Сегодня наиболее перспективными с точки зрения эффективности технологиями остаются солнечные элементы на основе гетеропереходов (НПТ), где тонкие слои аморфного кремния пассивируют поверхность кристаллической подложки. Однако их КПД приближается к теоретическому пределу, а сам аморфный кремний имеет недостатки, такие как паразитное поглощение в УФ-части спектра и ограниченная термостабильность. Это стимулирует активный поиск новых материалов и архитектур.

Одним из главных направлений стало создание наноструктурированной поверхности «черного кремния» (рисунок 1) методами сухого травления, что позволяет кардинально снизить отражение света в широком спектральном и угловом диапазоне. Такая поверхность потенциально позволяет отказаться от стандартных антиотражающих покрытий и повысить среднесуточную выработку энергии, особенно для стационарных панелей. Однако основная сложность заключается в нанесении качественных пассивирующих слоев на такую сложную трехмерную поверхность. Традиционный аморфный кремний часто наносится неоднородно, что ведет к дефектам и увеличению рекомбинационных потерь.

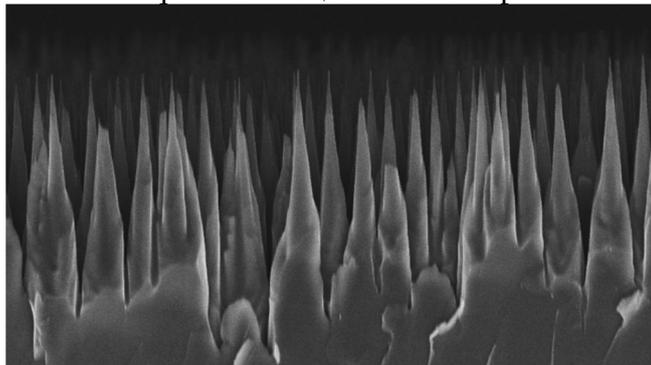


Рис. 1. Изображение растровой электронной микроскопии наноструктурированного «черного кремния»

В данной работе предлагается использовать для пассивации наноструктурированной поверхности ультратонкий слой оксида молибдена ( $\text{MoO}_x$ ) толщиной 2-5 нм. Этот широкозонный материал потенциально способен обеспечить эффективную пассивацию поверхностных состояний, минимизировать паразитное поглощение и выступать в роли селективного контакта для дырок [1]. Слои оксида молибдена осаждаются при помощи метода термического испарения, благодаря низкой энергии частиц не вносятся дополнительных дефектов в кремниевую подложку, что важно в производстве солнечных элементов. Таким образом, необходимо детальное исследование свойств этого слоя на развитой поверхности — его морфологии, состава и пассивирующей способности.

Полученные данные позволят оценить перспективы применения подобных гетероструктур в солнечных элементах нового поколения, которые могут преодолеть ограничения существующих технологий и сочетать эффективное поглощение света с хорошими электрическими характеристиками.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект №24-79-10275).*

1. Battaglia C., De Nicol 'as S.M., De Wolf S. et al. Appl. Phys. Lett. 2014. 104. 113902.

# АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ НАНОПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ТИТАНА, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ МЕТАЛЛОВ, НА ПОВЕРХНОСТЬ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МНОГОРАЗОВЫХ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ ВОДЫ

А.М. Максумова, М.Н. Гафурова, С.Г. Гаджимурадов,  
А.И. Абдулагатов, И.М. Абдулагатов  
ФГБОУ ВО ДГУ, ул. М. Гаджиева, 43а, Махачкала, 367000  
abay.maksumova2016@yandex.ru

В работе представлены результаты исследования по созданию и исследованию нанопокровов на основе диоксида титана, легированного атомами металлов (ванадием, молибденом и хромом) с использованием технологии атомно-слоевого осаждения (АСО) на поверхность стеклянных шариков, используемых в качестве фильтров для очистки воды. В качестве прекурсоров для АСО нанопокровов использовали  $TiCl_4$ ,  $VOCl_3$ ,  $MoO_2Cl_2$ ,  $CrO_2Cl_2$  и  $H_2O$ . Процесс осаждения осуществляли в диапазоне температур реакционной камеры 150-180 °С для формирования равномерных однородных и высококонформных нанопокровов на поверхности фильтрующих стекломатериалов. Толщина получаемых нанопленок составляла в диапазоне 10-30 нм. В качестве затравочного слоя предварительно на поверхность стеклянных шариков наносили АСО  $Al_2O_3$  толщиной ~ 5 нм, что улучшало адгезию нанопленок на основе легированного диоксида титана с подложкой и обеспечивало стабильность покрытия в водных средах.

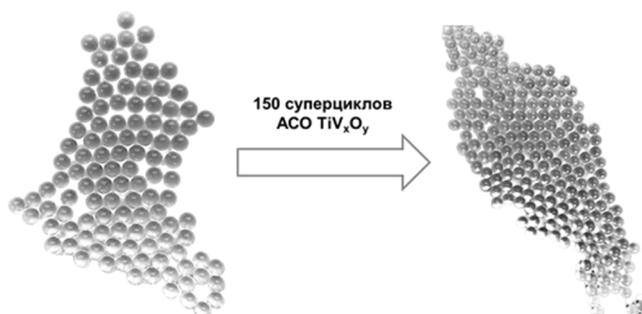


Рис. 1. Образцы стеклянных шариков до и после нанесения АСО титан-ванадиевого оксидного нанопокровов толщиной ~ 17 нм.

Нанопленки  $TiO_2$ , легированного ванадием, молибденом или хромом, проявили выраженные антибактериальные свойства, подавляя рост патогенных микроорганизмов (*E.coli*, *S.aureus*), а также демонстрировали высокую фотокаталитическую активность при разложении органических загрязнителей, что подтверждается снижением ХПК исследуемой воды и эффективным разрушением органических красителей.

Покрытие сохраняло стабильность без выделения ионов металлов в очищаемые пробы воды, что демонстрирует его безопасность для систем очистки питьевой воды. Технология АСО позволяет контролировать толщину и состав пленки на нанометровом уровне и получать равномерные покрытия на подложках сложной формы, что делает её перспективной для масштабного применения в фильтрующих системах.

*Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 25-23-20161).*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАЛЬНОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРЯДКА В СТРУКТУРЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ CVD-АЛМАЗНЫХ ПЛЁНОК

А.С. Митулинский, А.В. Гайдайчук, С.П. Зенкин, С.А. Линник

НИ ТПУ, просп. Ленина, 30, Томск, 634050

mitulinsky@tpu.ru

Нанокристаллические алмазные (NCD) плёнки, получаемые методом химического газофазного осаждения (CVD), представляют интерес благодаря совокупности уникальных свойств: низкой шероховатости, химической инертности и механической прочности. Структура пленок определяет их применимость в микроэлектронике, опто- и электрохимии, а также в MEMS/NEMS-устройствах. Характерной особенностью нанокристаллических алмазных плёнок является формирование специфической морфологии поверхности, которая в зарубежной литературе описывается как «cauliflower» из-за сферического паттерна. Однако механизмы, лежащие в основе возникновения такой структуры, остаются недостаточно изученными. Предполагается, что для формирования подобной морфологии в материале должны существовать элементы дальнего кристаллического порядка, обеспечивающие согласованность роста и самоорганизацию структурных единиц.

В работе исследовано формирование NCD-плёнок, синтезированных методом CVD с горячей нитью в газовой среде метана (15-23 об. %) и водорода, и особенности их внутреннего строения, выявляемые с помощью последующего термического окисления. Термический отжиг образцов производился в муфельной печи в атмосфере кислорода при температуре 725 °С.

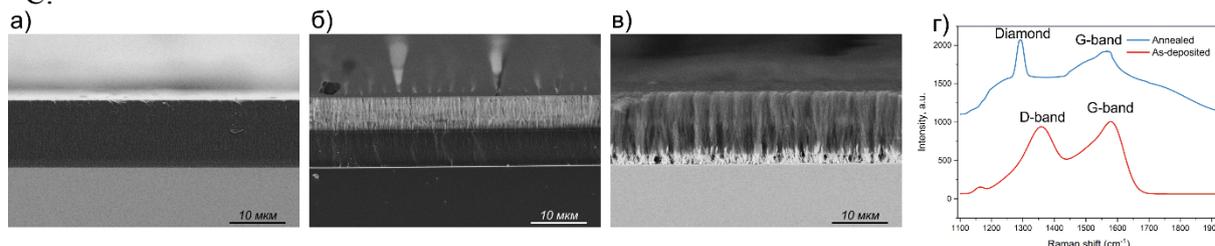


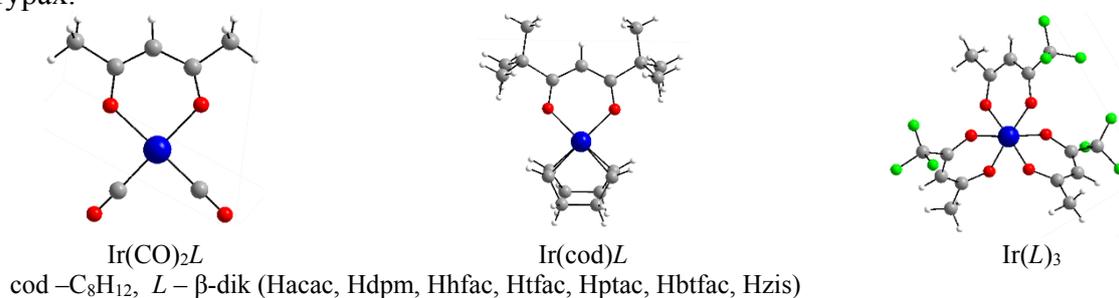
Рисунок 1. СЭМ-изображения поперечного сечения синтезированного нанокристаллического покрытия (а), отожжённого в течении 20 минут (б), отожжённого в течении 40 минут (в); спектры комбинационного рассеяния синтезированной пленки и отожжённой в течении 40 минут

Исходные плёнки демонстрируют гладкую поверхность и отсутствие выраженной кристалличности, что подтверждается СЭМ-изображениями. В спектре комбинационного рассеяния отсутствует характерный алмазный пик при  $1332\text{ см}^{-1}$ , что соответствует типичному поведению нанокристаллических алмазных покрытий. Проведённые Раман- и СЭМ-исследования выявили существенные изменения фазового состава и морфологии под воздействием процессов окисления. В ходе термообработки неалмазные фазы постепенно исчезают, тогда как интенсивность алмазного пика возрастает и пик становится отчётливо выраженным. СЭМ-анализ показывает, что после окисления плотная NCD-структура трансформируется, раскрывая алмазный «скелет» – совокупность иглообразных кристаллитов, формирующих внутреннюю архитектуру плёнки. Эти игольчатые образования обладают высокой степенью структурного упорядочения и, вероятно, близки к монокристаллическим. Таким образом, полученные результаты указывают на наличие дальнего порядка в системе кристаллических связей нанокристаллического алмаза.

## КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ Ir(I) и Ir(III) С $\beta$ -ДИКЕТОНАТ-ИОНАМИ

Н.В. Первухина, И.А. Байдина, С.А. Громилов  
ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
pervukh@niic.nsc.ru

Одним из наиболее востребованных свойств комплексов  $\beta$ -дикетонатных соединений с металлами является их возгонка и дальнейшее разложение при нагревании. Данное свойство находит широкое применение в промышленности для получения тонких пленок металлов и их оксидов методом химического осаждения в газовой фазе (МОСVD). Комплексы Ir(I) и Ir(III) с  $\beta$ -дикетонат-ионами традиционно используются в качестве прекурсоров в процессах МОСVD для функциональных покрытий, которые находят широкое применение в различных областях: в автомобильной и аэрокосмической промышленности, оптике для создания электрохромных устройств, и в медицине. Кристаллохимический анализ молекулярных комплексов Ir(I) и Ir(III) с  $\beta$ -дикетонат-ионами, структуры которых представлены в КБСД (18 соединений), позволяет рассмотреть особенности строения и способы упаковки молекул в кристаллических структурах.



Структуры соединений Ir(CO)<sub>2</sub>L и Ir(cod)L относятся к молекулярному типу, построены из мономерных нейтральных комплексов. В комплексах Ir(CO)<sub>2</sub>L атом Ir(I) имеет искаженно-квадратное окружение, длины связей Ir–O и Ir–C лежат в интервале 2.024 – 2.078, 1.799–1.883 Å. Анализ упаковок комплексов Ir(CO)<sub>2</sub>L показал наличие металлофильных контактов Ir...Ir в достаточно узком интервале 3.21–3.56 Å, за счет которых реализуется стопочная укладка молекул. В структурах комплексов Ir(CO)<sub>2</sub>L наблюдается тенденция к гексагональной упаковке молекул. В комплексах Ir(cod)L атом Ir(I) также имеет искаженно-квадратное окружение, длины связей Ir–O и Ir–C<sup>\*</sup> равны 2.033 – 2.073, 1.971–2.003 Å. Значения углов перегибов хелатного цикла  $\lambda$  лежат в интервале 0–6.9°. В структурах Ir(cod)L атом Ir(I) экранирован cod-лигандом, что делает невозможным взаимодействие Ir...Ir между соседними молекулами, минимальные расстояния между центральными атомами Ir... Ir 5.12 Å. Показано, что в этих структурах молекулы часто объединены в «псевдодимеры» с образованием стопок по принципу «голова к хвосту» со значительным взаимным смещением молекул. В структуре Ir(cod)(dpm) обнаружены полости объемом 11.5 Å<sup>3</sup>. Для Ir(III) известны структуры комплекса Ir(aa)<sub>3</sub> и трех его  $\gamma$ -замещенных комплексов с Cl, Br и I, а также двух фторированных  $\beta$ -дикетонатов Ir(III) – *транс*-Ir(tfa)<sub>3</sub> и Ir(hfa)<sub>3</sub>, которые изоструктурны аналогичным комплексам Fe(III). В структурах всех соединений средние значения расстояний Ir–O 2.00 Å, а углов  $\angle$ OIrO – 94.2°. Углы перегиба хелатных циклов  $\lambda$  не превышают 9.8°. Расстояния между центральными атомами Ir... Ir в структурах больше 7.47 Å.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 125021302132-4.

# СИНТЕЗ, СТРОЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСОВ ТРИФТОРАЦЕТИЛАЦЕТОНАТА МАГНИЯ С 2,2'-БИПИРИДИНОМ И 1,10-ФЕНАНТРОЛИНОМ

У.Ю. Пигалина<sup>1</sup>, М.А. Аксенова<sup>1</sup>, Э.А. Рихтер<sup>2</sup>, Д.В. Кочелаков<sup>2</sup>, Е.С. Викулова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НГУ, ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

u.pigalina@g.nsu.ru

Разнолигандное комплексообразование – эффективный прием дизайна координационных соединений мооядерного строения, которые наиболее востребованы в качестве прекурсоров для процессов химического осаждения из газовой фазы (МОСVD). Для этой цели в качестве нейтральных лигандов наиболее часто используют алифатические производные, поскольку введение ароматических фрагментов, как правило, приводит к межмолекулярному стэкингу, существенно снижающему летучесть. Вместе с тем, именно хелатирующие ароматические производные Q, такие как 2,2'-бипиридин (bipy) и 1,10-фенантролин (phen), обеспечивают стабильность соединений, что критически важно для ряда металлов, например, для магния. Поэтому разработка новых потенциально летучих комплексов магния с Q = bipy и phen и изучение влияния лигандов на их строение является актуальной задачей. В качестве анионных лигандов ранее были опробованы β-дикетонаты ( $L^- = R^1C(O)CHC(O)R^2$ ): при  $R^1, R^2 = 'Bu, CF_3$  (L = thd, hfac) комплексы  $[Mg(Q)(L)_2]$  термически стабильны, но их летучесть понижена [1]. Напротив, при малых  $R^1, R^2 = CH_3$  (L = acac), комплексы разлагаются при нагревании, но в их структурах стэкинг отсутствует [2]. В этой связи, данная работа посвящена синтезу и исследованию аналогов для «промежуточного» L:  $R^1 = CF_3, R^2 = CH_3$  (L = tfac, трифторацетилацетонат).

Новые комплексы  $[Mg(Q)(tfac)_2]$  (Q = bipy и phen) получены с выходами 70-80% по реакции замещения аква-лигандов в  $[Mg(H_2O)_2(tfac)_2] \cdot H_2O$  и охарактеризованы с помощью элементного анализа, ИК- и ЯМР-спектроскопии. По данным РСА,  $CF_3$ -группы расположены в *цис*-положении. При Q = bipy, в стэкинг вовлечен только один гетероцикл, и такие контакты образуют димеры молекул (рис. 1а), тогда как при Q = phen подобные взаимодействия отсутствуют (рис. 1б). По данным ТГА, при Q = phen новый комплекс сопоставим по летучести с аналогом для L = acac, но более стабилен (остаток массы: 6.7 против 37.0%). Увеличение термостабильности при такой замене L наблюдается и для Q = bipy: новый комплекс стабилен до ~300°C (для L = acac: отщепление bipy ~200°C), но он менее летучий, чем аналог для L = hfac (различие в  $T(50\% \text{ потери массы}) \sim 60^\circ C$ ).

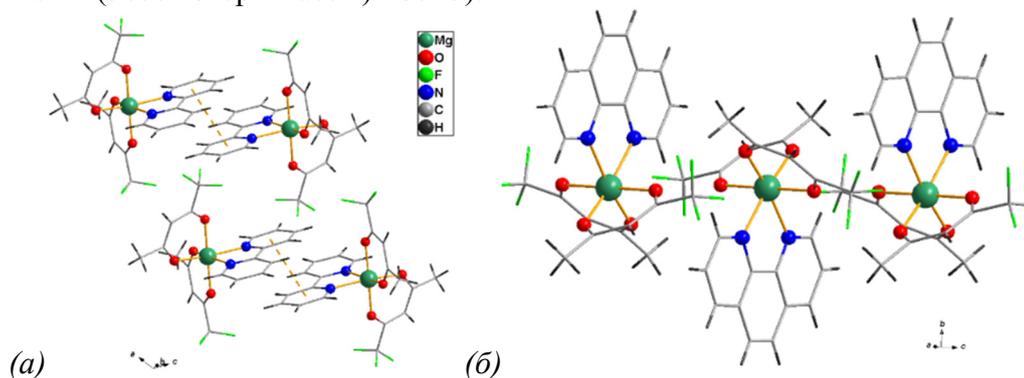


Рис. 1. Фрагменты упаковки молекул комплексов  $[Mg(Q)(tfac)_2]$ , Q = bipy (а) phen (б).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 24-79-10272.

[1] Zherikova K.V. et al. // Thermochim. Acta. 2020. Vol. 689, 178643.

[2] Brahma S. et al. // J. Mol. Struct. 2013. Vol. 1035. P. 416–420.

## РОЛЬ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ В УПРАВЛЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ PECVD ПЛЕНОК SiOCH

А.Г. Плеханов, Е.Н. Ермакова, В.Р. Шаяпов, Е.А. Максимовский, М.Л. Косинова  
ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
plehanov@niic.nsc.ru

Тонкие пленки диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) традиционно применяются в качестве диэлектрических слоев благодаря их превосходной химической стабильности и надежным электрофизическим характеристикам. Однако с развитием микро- и нанoeлектронных технологий диэлектрические характеристики  $\text{SiO}_2$  ( $\epsilon \approx 3.9$ ) оказываются недостаточными для снижения паразитных емкостей в интегральных схемах. Одним из известных подходов к снижению диэлектрической постоянной является введение углеродсодержащих фрагментов, в частности терминальных метильных групп ( $-\text{CH}_3$ ) в оксидную матрицу, что приводит к уменьшению поляризуемости и плотности материала. В результате формируются аморфные материалы гидрогенизированного оксикарида кремния ( $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$ ), представляющие собой матрицу на основе  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  с включениями мостиковых  $-\text{CH}_2-$  и терминальных  $-\text{CH}_3$  групп.

В данной работе методом PECVD получены тонкие пленки  $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$  с использованием смеси двух кремнийорганических прекурсоров — тетраэтоксисилана  $(\text{EtO})_4\text{Si}$  (TEOS) и тетраметилсилана  $\text{Me}_4\text{Si}$  (TMS) в различных соотношениях. Целью работы являлось исследование влияния концентрации метильных фрагментов на его диэлектрические свойства.

Для характеристики пленок применяли методы эллипсометрии, ИК-спектроскопии, СЭМ, ЭДС, спектроскопии КРС и РФЭС. Метод оптической эмиссионной спектроскопии использовали для анализа состава активных частиц газовой фазы, образующихся в процессе плазмохимического разложения прекурсоров. Спектры оптической эмиссии регистрировали *in-situ* при различных параметрах синтеза, что позволило оценить влияние условий плазмы на состав и строение осажденных пленок.

Синтез проводили при постоянных значениях температуры подложки  $T_{\text{oc}}=100$  °C и мощности ВЧ-разряда 40 Вт. Для исследования влияния соотношения прекурсоров был введен параметр  $R=p(\text{TEOS})/[p(\text{TEOS})+p(\text{TMS})]$ , который принимал значения 0, 0.25, 0.5, 0.75 и 1. По данным СЭМ все полученные пленки являются сплошными и однородными, без выраженных морфологических особенностей. При увеличении доли TEOS в исходной газовой смеси наблюдается снижение содержания кремния и углерода от 15 до 9 ат.% и от 73 до 60 ат.% соответственно, при одновременном увеличении содержания кислорода от 9 до 30 ат.%. Вследствие наличия остаточной атмосферы в реакторе в составе пленок также обнаружен азот в количестве 1–4 ат.%.

Данные РФЭС свидетельствуют об увеличении доли кислорода и снижении доли углерода в окружении кремния. Существенные изменения наблюдаются в ИК-спектрах пленок. Осажденные образцы характеризуются различной концентрацией терминальных метильных групп, пропорциональной содержанию TMS в исходной газовой смеси; при этом интенсивность полосы поглощения, соответствующей колебаниям связей  $\text{Si}-\text{CH}_3$ , уменьшается с ростом параметра  $R$ . При  $R=0$  ИК-спектр содержит сигналы от полос  $\text{Si}-\text{C}$  и  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ . С увеличением  $R$  вклад  $\nu(\text{Si}-\text{O}-\text{Si})$  растет, а  $\nu(\text{Si}-\text{C})$  уменьшается, почти исчезая при  $R=0.75$  и не обнаруживается при  $R=1$ .

При увеличении  $R$  от 0 до 1 диэлектрическая проницаемость пленок снижается от 4.4 до 3.5, при этом напряжение пробоя составляет  $E_{\text{пр}} \approx (5-6) \times 10^6$  В/см, что превосходит значения, определяемые для  $\text{SiO}_2$ . Исследование стабильности пленок в течение 140 ч показало, что в первые часы после извлечения из реактора состав претерпевает незначительные изменения, после чего содержание элементов остается стабильным.

## РАЗРАБОТКА МТР ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ CVD СИНТЕЗА ГРАФЕНА

В.О. Рябов<sup>1</sup>, В.А. Андриященко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НГУ, ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>ИТ СО РАН, пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090  
vitaliy.ryabov.1999@mail.ru

Актуальность исследования обусловлена ключевой ролью графена в современной нанoeлектронике благодаря его исключительным электрическим [1] и тепловым свойствам [2], а также тем, что CVD остаётся наиболее надёжным и масштабируемым методом получения больших по площади графеновых плёнок. Для понимания механизмов роста графена требуется моделирование на атомистическом уровне, однако точность классических молекулярно-динамических расчётов ограничена применяемыми потенциалами. В данной работе создан машинообучаемый *moment tensor potential* (МТР)-потенциал [3], обученный на DFT-данных для систем, включающих медь и углерод. Обучение проводилось поэтапно: сначала на небольшой выборке конфигураций, затем с использованием активного обучения при молекулярно-динамических (МД) - симуляциях роста углеродных структур. Такой подход позволил расширить обучающую выборку и охватить локальные атомные окружения, характерные для реальных условий осаждения. Тестирование показало, что разработанный потенциал воспроизводит силы взаимодействия с лучшей точностью в сравнении с эмпирическими потенциалами приближенной к DFT, что обеспечивает высокую надёжность моделирования. На основе нового потенциала выполнены МД-симуляции осаждения углеродного газа на поверхность Cu (100) в диапазоне температур 300–1200 К.

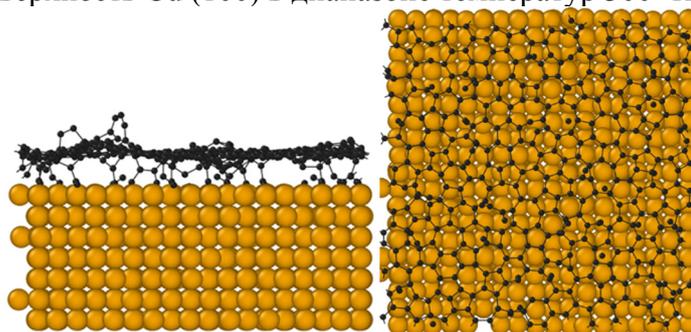


Рис. 1. Характерные изображения графенового покрытия на медной подложке

Результаты показали послойный характер формирования графеновых структур, образование связей между первыми углеродными атомами и медью, а также зависимость качества плёнки от температуры. Анализ радиальной функции распределения подтвердил, что наибольшее количество гексагональных структур получается при температуре 1000 К благодаря оптимальной подвижности атомов. Проведённое исследование демонстрирует, что МТР-потенциал обеспечивает реалистичное и точное моделирование процессов CVD-синтеза графена и может использоваться для дальнейших исследований механизмов его роста.

1. Chen, H. et al. Mechanically strong, electrically conductive, and biocompatible graphene paper // *Advanced Materials*. 2008. 20, № 18. 3557-3561.
2. Balandin, A. A. et al Superior thermal conductivity of single-layer graphene // *Nano Letters*., 2008. 8, № 3.902-907.
3. Shapeev, A. V. Moment tensor potentials: A class of systematically improvable interatomic potentials // *Multiscale Modeling and Simulation*, 2016. 14, № 3. 1153-1173.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ $\beta$ -ДИКЕТОНАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ МЕДИ(II) И ИНДИЯ(III) ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И СОВМЕСТНОГО ОСАЖДЕНИЯ В МОСVD-ПРОЦЕССАХ

А.В. Сартакова<sup>1,2</sup>, С.В. Сысоев<sup>1</sup>, А.М. Макаренко<sup>1,2</sup>, Е.С. Викулова<sup>1</sup>,  
К.В. Жерикова<sup>1,2</sup>, А.А. Жеравин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>ФГБУ «НМИЦ им. академика Е.Н. Мешалкина», ул. Речкуновская, 15, Новосибирск, 630055

a.sartakova@alumni.nsu.ru

$\beta$ -Дикетонатные комплексы металлов ( $M(R_1C(O)CHC(O)CR_2)_n$ ) являются одними из наиболее популярных МОСVD-прекурсоров для получения покрытий разнообразных составов, поскольку обладают достаточной летучестью и стабильностью. Кроме того, их термические свойства можно широко варьировать за счёт изменения терминальных заместителей. Это открывает возможности для использования  $\beta$ -дикетонатов разных металлов для совместного осаждения. Так, например, плёнки оксида индия активно используются как ППО, осаждённые наночастицы меди перспективны в качестве антибактериальных агентов для покрытий имплантатов. В то же время смешаннооксидная фаза  $Cu_2In_2O_4$  привлекательна за счёт магнитных и фотокаталитических свойств, а делафоссит  $CuInO_2$  является ППО, способным реализовывать оба типа проводимости в зависимости от природы легирующей добавки.

В данной работе исследованы  $\beta$ -дикетонатные комплексы индия(III) и меди(II) с различными терминальными заместителями  $R_1$  и  $R_2$ : с помощью ТГ/ДТА и ДСК определены их температура и термодинамические характеристики плавления; определены их давления насыщенных паров с помощью метода потока, статического метода с мембранным нульманометром и эффузионного метода Кнудсена.  $\Delta C_p$  парообразования комплексов оценены эмпирически, благодаря их значениям энтальпия и энтропия парообразования отнесены как к средней температуре экспериментального интервала, так и к стандартной или требуемой для осаждения покрытий в МОСVD-процессе.

С целью подбора оптимальных условий осаждения разнообразных индий- и медьсодержащих материалов изучена зависимость равновесного фазового состава систем прекурсор-реакционный газ в зависимости от соотношения реакционной смеси при определённых давлениях и температурах для некоторых  $\beta$ -дикетонатных комплексов. Данные представлены в виде CVD-диаграмм.

*Исследование комплексов меди(II) выполнено при финансовой поддержке РФФ, проект 25-15-00328.*

*Авторы благодарят сотрудников ЦКП ИНХ СО РАН, Химическому исследовательскому ЦКП СО РАН за предоставленную возможность использования приборной базы, а также сотрудников ИГХТУ д.х.н. Моталова В.Б. и к.х.н. Дунаева А.М. за проведение экспериментов по определению давления насыщенных паров методом Кнудсена.*

# ЛЕТУЧИЕ РАЗНОЛИГАДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ МАГНИЯ: ВЛИЯНИЕ НЕФТОРИРОВАННОГО $\beta$ -ДИКЕТОНАТА НА СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА

Ю.В. Серова<sup>1,2</sup>, А.В. Стригуновская<sup>1</sup>, Э.А. Рихтер<sup>1</sup>,  
Д.В. Кочелаков<sup>1</sup>, А.А. Сухих<sup>1</sup>, Е.С. Викулова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090  
y.serova@g.nsu.ru

Разнолигандные комплексы (РЛК) магния типа  $[Mg(Q)(L)_2]$ , где L =  $\beta$ -дикетонат-анион (RCOCHCOR'), Q = нейтральный бидентатный N-донор, являются перспективным классом летучих прекурсоров. Их термические свойства можно широко варьировать за счет комбинаций Q и L. Отсутствие фтора в прекурсорке позволяет получать оксидные материалы при более низких температурах и избежать образования агрессивных продуктов распада. Однако при этом возникает проблема стабильности комплексов, связанная с диссоциацией нейтрального лиганда. Для её решения варьируют нейтральный лиганд, фокусируясь на  $\beta$ -дикетонате L = thd (R = R' = 'Bu) [1, 2]. Другие РЛК рассматриваемого типа ограничены несколькими примерами для L = acac (R = R' = Me), но они менее стабильны [3, 4]. В данной работе впервые изучено влияние нефторированного  $\beta$ -дикетонатного лиганда на строение и свойства потенциально летучих РЛК магния.

Для этого получена серия новых РЛК с алифатическим (tmeda = N,N,N',N'-тетраметилэтилендиамин) и ароматическими (bipy = 2,2'-бипиридин, phen = 1,10-фенантролин) Q.  $\beta$ -Дикетонаты подобраны так, чтобы показать эффект «промежуточной» терминальной группы (L = hd, R = R' = Et) относительно известных аналогов, симметрии лиганда (L = tmod, R = 'Bu, R' = 'Bu) и введения гетероатома (L = zis, R = 'Bu, R' = Me<sub>2</sub>OMe). Все РЛК охарактеризованы методами элементного анализа, ИК- и ЯМР-спектроскопии. Строение комплексов установлено методом РСА (пример: рис. 1а), за исключением жидких  $[Mg(tmeda)(L)_2]$ , L = tmod (медленно затвердевает, > 2 мес.), hd (нестабилен на воздухе). Для РЛК с ароматическими аминами (Q = bipy/phen) уменьшение объема терминальных групп в L (thd [2] => hd, acac [4]) предотвращает стэкинг-контакты в структурах.

Термические свойства РЛК также изучены с помощью ТГА и сублимационных тестов. Показано, что при всех Q замена L = acac на hd увеличивает термостабильность комплекса, однако, не до требуемой для МОСVD применения (рис. 1б). Для  $[Mg(tmeda)(L)_2]$ , введение гетероатома в 'Bu-группу (L = thd => zis) или изомерного лиганда (L = thd => tmod) понижает термостабильность, способствуя диссоциации диамина.

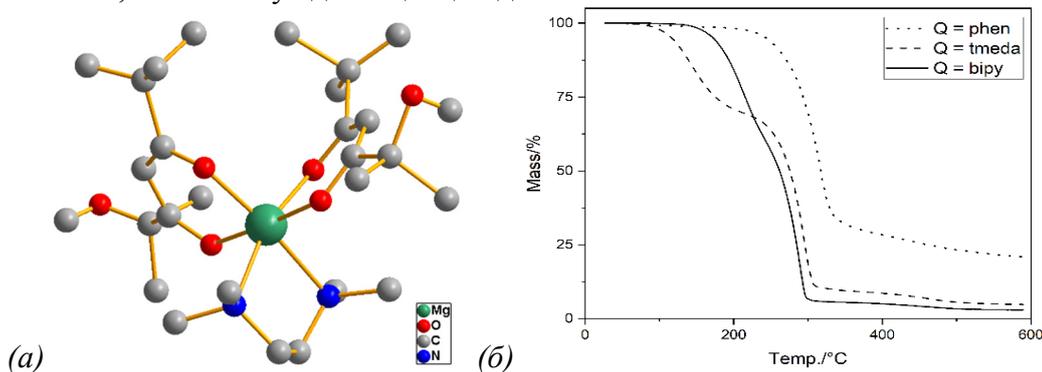


Рис. 1. Строение  $[Mg(tmeda)(zis)_2]$  (а) и кривые ТГ для  $[Mg(Q)(hd)_2]$ , Q = tmeda/bipy/phen (б).

- [1] Brahma S. et al. // J Mol Struct. 2013. 1035. 416–420.
- [2] Hatanpää T. et al. // Inorg Chem. 2001. 40, № 4. 788–794.
- [3] Zherikova K. V. et al. // Thermochim Acta. 2020. 689. 178643.
- [4] Halz J.H. et al. // IUCrdata., 2022. 7. x221035

# N-МЕТОКСИМЕТИЛПРОПАНАМИДАТ ГАФНИЯ (□): НОВЫЙ ЛЕТУЧИЙ ПРЕКУРСОР ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ СЛОЕВ HfO<sub>2</sub>

Б.А. Ситчихин<sup>1,2</sup>, Б.Ю. Савков<sup>1</sup>, И.Ю. Ильин<sup>1</sup>, А.С. Сухих<sup>1</sup>, Д.П. Пищур<sup>1</sup>, Е.С. Викулова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090

b.sitchikhin@g.nsu.ru

Развитие процессов получения HfO<sub>2</sub> методом атомно-слоевого осаждения (ALD) в настоящее время во многом связано с применением этих слоев в устройствах резистивной и сегнетоэлектрической памяти [1]. Для этого предпочтительны более высокие температуры роста (от 300°C), что требует использования ALD прекурсоров, обладающих повышенной термической стабильностью. В данном аспекте перспективны молекулярные комплексы Hf(IV) с N-алкоксикарбоксамидатными лигандами (L<sup>-</sup> = RC(O)NOR'), которые обладают необходимыми для ALD летучестью и реакционной способностью и стабилизированы сопряжением в органической части. В литературе описаны производные для L, где R = <sup>t</sup>Bu (R' = Me/Et), R = <sup>i</sup>Pr (R' = Et), причем при комбинации <sup>t</sup>Bu и Me-групп соответствующий комплекс Hf(mpda)<sub>4</sub> обладает наиболее высокими летучестью и термостабильностью, но также сравнительно высокой температурой плавления (~140°C) [2]. Чтобы получить более низкоплавкий комплекс, мы предложили заменить <sup>t</sup>Bu-группу на <sup>i</sup>Pr, т.е. использовать N-метоксиметилпропанамидный лиганд (L = mmpa).

Таким образом, целью данной работы является синтез N-метоксиметилпропанамидата гафния, Hf(mmpa)<sub>4</sub>, и его исследование как нового прекурсора для осаждения слоев HfO<sub>2</sub>. Показано, что наряду с традиционной стратегией синтеза из Hf(NMe<sub>2</sub>)<sub>4</sub> и HL [2], эффективна реакция более доступного HfCl<sub>4</sub> с соответствующей натриевой солью (выход 82%). По данным ИСП-АЭС (62 элементов-примесей), чистота вещества составляет 4N6 и 5N8 (с и без учета Zr, соответственно), что достаточно для применения в микроэлектронике.

С помощью РСА установлено, что новый комплекс имеет молекулярное строение, подобное аналогу Hf(mpda)<sub>4</sub>, но отличается наличием низкотемпературного структурного перехода (-85.7°C), вызванного разупорядочением <sup>i</sup>Pr-группы (пр.гр. P-1 => C2/c, рис. 1а). Термические свойства Hf(mmpa)<sub>4</sub> изучены с помощью ТГА в сравнении с аналогом Hf(mpda)<sub>4</sub> и «референсным» β-дикетонатом – дипивалиолметанатом Hf(thd)<sub>4</sub> (рис. 1б). Показано, что оба N-метоксикарбоксамидата являются существенно более летучими по сравнению с Hf(thd)<sub>4</sub> (T<sub>50%</sub> потери массы: ~225°C << 300°C), но менее термически стабильны при парообразовании (степени разложения при 240°C при 30-40%). По данным ДСК, новый комплекс действительно оказался более низкоплавким: Hf(mmpa)<sub>4</sub>: 98.8 ± 0.5°C, Δ<sub>пл.</sub>H = 32.9 ± 0.3 кДж/моль, Hf(mpda)<sub>4</sub>: 139.7 ± 0.6°C, Δ<sub>пл.</sub>H = 34.8 ± 1.1 кДж/моль.

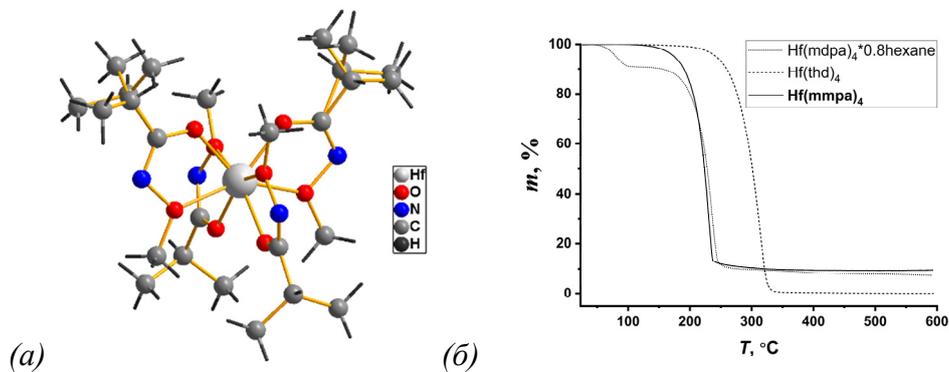


Рис. 1. Строение Hf(mmpa)<sub>4</sub> (-23°C) (а) и кривые ТГ для обсуждаемых комплексов (б).

[1] Banerjee W., Kashir A., Kamba, S. // Small. 2022. 18(23). 2107575.

[2] Lee G.Y. et al. // Inorg. Chem. 2021. 60(23). 17722–17732.

# КОМПЛЕКСЫ МАГНИЯ С НЕФТОРИРОВАННЫМИ $\beta$ -ДИКЕТОНАМИ: ВЛИЯНИЕ АРОМАТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛЬНОГО ЛИГАНДА НА СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА

А.В. Стригуновская<sup>1,2</sup>, Э.А. Рихтер<sup>1</sup>, К.А. Виноградова<sup>1,2</sup>, Д.В. Кочелаков<sup>1</sup>, А.С. Сухих<sup>1</sup>,  
Е.С. Викулова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090

lina.strigunovskaya.02@mail.ru

Летучие комплексы магния с нефторированными  $\beta$ -дикетонами перспективны для получения наноматериалов, содержащих оксид магния, методом химического осаждения из газовой фазы (MOCVD). Однонороднолигандные производные типа  $[\text{Mg}(\text{L})_2]_n$  имеют олигоядерное строение ( $n = 2,3$ ), что осложняет использование, тогда как введение нейтрального бидентатного лиганда Q позволяет получать моноядерные комплексы  $[\text{Mg}(\text{Q})(\text{L})_2]$ . В качестве Q наиболее эффективны бидентатные (N,N)-донорные молекулы, однако, алифатические диамины могут отщепляться при продолжительном нагревании при температурах парообразования в MOCVD [1]. Ароматические производные (например,  $\text{bipy} = 2,2'$ -бипиридил), напротив, образуют более стабильные комплексы, но их летучесть понижается на несколько порядков вследствие цепочечных стэкинг-взаимодействий между гетероциклами [2]. Таким образом, актуален подбор лиганда Q для обеспечения оптимального баланса летучести и стабильности комплексов.

В этой связи, настоящая работа посвящена исследованию влияния ароматического нейтрального лиганда на строение и термические свойства  $\beta$ -дикетонатных комплексов  $[\text{Mg}(\text{Q})(\text{L})_2]$  на примере классического  $\text{L} = \text{thd}$  (2,2,6,6-тетраметилгептан-3,5-дионат). Рассмотрены такие производные, которые могут уменьшать стэкинг между молекулами вследствие стерического эффекта ( $\text{tbbipy} = 4,4'$ -дитретбутил-2,2'-бипиридил) или нарушения регулярности цепочек ( $\text{dmpzz} = 2$ -(3,5-диметил-1H-пиразол-1-ил)пиразин);  $\text{pClpdz} = 3$ -(пиразолил-1)-6-хлорпиразин). Впервые апробированы лиганды, «комбинирующие» ароматический и алифатический фрагмент:  $\text{hpz} = 2$ -гидразинопиперазин;  $\text{dmampy} = 2$ -(диметиламинометил)пиридин). Объектом сравнения выбран  $[\text{Mg}(\text{bipy})(\text{thd})_2]$ .

С помощью РСА установлено, что введение  $^4\text{Bu}$ -групп в Q ( $\text{bipy} \Rightarrow \text{tbbipy}$ ) в  $[\text{MgQ}(\text{thd})_2]$  эффективно предотвращает стэкинг: минимальные расстояния между гетероциклами возрастают от 3.18 Å до 7.16 Å. При этом, однако, понижается как температура плавления (220°C / 160°C), так и летучесть комплексов (ТГА:  $T_{50\% \text{потери массы}} = 240^\circ\text{C} / 290^\circ\text{C}$ ). Это может быть обусловлено увеличением молекулярной массы (на 21%). В отличие от аналога,  $[\text{Mg}(\text{tbbipy})(\text{thd})_2]$  проявляет низкотемпературный структурный переход:  $P-1$  (150 K)  $\Rightarrow C2/c$  (250 K) и образует сольват  $[\text{Mg}(\text{tbbipy})(\text{thd})_2] \cdot \text{C}_6\text{H}_6$ .

Пиразин-пиразолатные лиганды ( $\text{Q} = \text{dmpz}$  и  $\text{pClpdz}$ ), в отличие от  $\text{bipy}$ , не замещают аква-лиганды в  $[\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{L})_2]$ . Посредством разбиения димера  $[\text{Mg}_2(\text{thd})_4]$  получен комплекс  $[\text{Mg}(\text{dmpz})(\text{H}_2\text{O})(\text{thd})_2]$ , в котором методом РСА показана модентатная 4-N координация нейтрального лиганда. Эти особенности можно объяснить с затрудненным *цис-транс*-превращением  $\text{dmpz}$  и  $\text{pClpdz}$ . Гидразинопиперазиновый лиганд  $\text{hpz}$ , напротив, замещает аква-лиганды в  $[\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{thd})_2]$ . При сублимации продукта получены кристаллы  $[\text{Mg}_2(\text{hpz})(\text{thd})_4]$ , в которых нейтральный лиганд координирован монодентатно, а строение биядерного узла принципиально отличается от такового в  $[\text{Mg}_2(\text{thd})_4]$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект №. 24-79-10272.*

[1] Sartori A. et al. // J. Chem. Mater. 2011. 23. N. 5. 1113-1119.

[2] Zherikova K. V. et al. // Thermochim. Acta. 2020. 689. 178643.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИНИЛМЕТИЛДИЭТОКСИСИЛАНА

А.А. Урбах<sup>1,2</sup>, Л.Н. Зеленина<sup>1,2</sup>, Е.Н. Ермакова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090  
a.urbakh@g.nsu.ru

С целью получения плёнок на основе диоксида и карбида кремния широко применяется метод химического осаждения из газовой фазы (CVD). В качестве прекурсоров используются различные оксисиланы, а также галогенсодержащие кремнийорганические соединения, благодаря их стабильности и высокой летучести.

В работе был исследован винилметилдиэтоксисилан  $(\text{CH}_2=\text{CH})(\text{CH}_3)\text{Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_2$  (заявленная чистота вещества  $\geq 97\%$ ;  $\rho = 0,858$  г/мл;  $T_{\text{кип.}} = 133^\circ\text{C}$ ). Для подтверждения структуры соединения и его чистоты были сняты ИК-спектры до и после проведения тензиметрического эксперимента. Полученные спектры идентичны и полностью соответствуют структуре исследуемого вещества.

Давление насыщенных и ненасыщенных паров измерено методом статической тензиметрии с мембранными нуль-манометрами в широком диапазоне температур (295-383 К) и давлений (8-404 Торр), при этом точность измерения давления составляла 0.3 Торр, температуры – 0.5 К [1]. Данные по давлению ненасыщенного пара ( $M = mRT/pV = 160,4 \pm 1$  г/моль) свидетельствуют о том, что рассматриваемое кремнийорганическое соединение переходит в газовую фазу в виде мономера. Экспериментальные данные по насыщенному пару ( $p(T)$ ) обработаны методом наименьших квадратов с целевой функцией, основанной на принципе максимального правдоподобия [2]. В результате обработки получены значения термодинамических характеристик процессов испарения ( $\Delta_{\text{исп.}}H^\circ_{T_{\text{ср}}} = 43,2 \pm 2,8$  кДж/моль;  $\Delta_{\text{исп.}}S^\circ_{T_{\text{ср}}} = 107,4 \pm 7,8$  Дж/(моль\*К);  $\ln(p/p^0) \pm t_s\sigma = 12,92 - 5192,4/T$ ;  $\sigma^2 = 130,86/T^2 - 0,755/T + 0,0011$ ).

С целью определения условий формирования плёнок  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiC}$  с использованием  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2$  в качестве сопутствующих реагентов было проведено термодинамическое моделирование процессов CVD с участием винилметилдиэтоксисилана в качестве прекурсора. Расчёт, проведённый по прикладной программе БД СМЭТ [3], основан на минимизации общей энергии Гиббса исследуемой системы. Стандартные термодинамические характеристики индивидуальных соединений ( $\Delta_f H^\circ_{298}$ ,  $S^\circ_{298}$ ,  $C^\circ_p = f(T)$ ) использовались как первоначальная информация. В результате был определён равновесный состав осаждаемых фаз и парциальные давления газообразных компонентов системы в широком интервале температур, давлений, состава исходных реагентов и мольных соотношений подаваемых компонентов.

В ходе моделирования были определено, что карбид кремния в исследуемом интервале температур (500-1400 К) представляет собой кубическую фазу, в то время как диоксид кремния в зависимости от температуры существует в 3-х различных кристаллических модификациях:  $\alpha$ -кварц (500-848 К),  $\beta$ -кварц (848-1200 К) и  $\beta$ -кristобалит (1200-1400 К).

1. L. Zelenina, T. Chusova, S. Sapchenko, E. Ukraintseva, D. Samsonenko, V. Fedin // JCT. 67. 2013. P. 128.

2. Титов В.А., Коковин Г.А. // сб. Математические методы в химической термодинамике. Новосибирск: Наука. 1980. С. 98.

3. F.A. Kuznetsov, V.A. Titov, A.A. Titov, L.I. Chernyavskii Data bank of properties of microelectronic materials // Proceedings of the international symposium on advanced materials. Japan. 1995. P. 24–30.

# МОДИФИКАЦИЯ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ТЕТРАЦИАНОХИНОДИМЕТАНОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМПУЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГАЗОВ

Ю.В. Федосеева, В.И. Сысоев, Г.И. Семушкина, С.А. Лаврухина, Е.В. Лисица,  
О.А. Гурова, Е.А. Максимовский, Л.Г. Булушева, А.В. Окотруб  
<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
fedoseeva@niic.nsc.ru

Нековалентная модификация одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) органическими молекулами, которые способны принимать электроны, приводит к изменению электронных свойств ОУНТ. Это может значительно повысить чувствительность резистивных сенсоров на основе тонких пленок из ОУНТ к обнаружению газов. Тетрацианохинодиметан (tetracyanoquinodimethane - TCNQ) – стабильное органическое соединение, действующее как сильный акцептор электронов. В данном исследовании TCNQ наносился на тонкую проводящую пленку, состоящую из ОУНТ с предварительно открытыми концами, методом испарения-конденсации в герметичной кварцевой ампуле при температурах 200, 250 и 300 °С. Обнаружено что молекулы TCNQ покрывают тонким слоем поверхность ОУНТ и подложки, а при температуре синтеза выше 250 °С наблюдался рост нитевидных микрокристаллов TCNQ. Из анализа микрофотографий, полученных растровой электронной микроскопией, было установлено, что размер и количество кристаллов TCNQ, осажденных на поверхность пленки ОУНТ, увеличивались с повышением температуры осаждения от 250 до 300 °С. Трехкратная промывка образца, модифицированного при температуре 300 °С, ацетонитрилом привела к полному растворению микрокристаллов TCNQ. Спектроскопия комбинационного рассеяния света и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия использовались для исследования состава поверхности модифицированных пленок и анализа зарядового состояния TCNQ и ОУНТ. Обнаружено, что TCNQ находится в трех различных зарядовых состояниях на поверхности пленок ОУНТ, а именно в нейтральном и двух отрицательно-заряженных состояниях. Квантово-химическое моделирование показало, что инкапсулированные молекулы TCNQ принимают в два раза больший отрицательный заряд от ОУНТ по сравнению с TCNQ, адсорбированными на внешней поверхности ОУНТ. Нейтральные молекулы TCNQ можно легко удалить с поверхности образца, растворив их в ацетонитриле. Однако отрицательно заряженные поверхностные молекулы TCNQ прочно связываются с поверхностью ОУНТ и не удаляются растворением в ацетонитриле. Было проведено сравнительное тестирование модифицированных TCNQ пленок ОУНТ в качестве газовых сенсоров для определения 100 ppm аммиака и 1 ppm диоксида азота при температуре 90°. Осаждение TCNQ улучшило электропроводность сенсора из ОУНТ. Чувствительность сенсора ОУНТ к аммиаку увеличилось после осаждения TCNQ, и растет с ростом температуры осаждения до 250 °С. При температуре осаждения 300 °С образовались крупные, плотно расположенные микрокристаллы TCNQ, которые покрывают поверхность ОУНТ, уменьшая ее площадь, доступную для адсорбции молекул целевого газа. После удаление микрокристаллов TCNQ отклик на NH<sub>3</sub> вырос, так как доминирующими местами обнаружения NH<sub>3</sub> является поверхность ОУНТ. Чувствительность сенсора из ОУНТ к акцепторным молекулам NO<sub>2</sub>, ухудшилась, что было связано с акцепторными свойствами TCNQ. Удаление избытка кристаллов TCNQ с поверхности сенсора с помощью ацетонитрила приводит к повышению чувствительности сенсора к NO<sub>2</sub>.

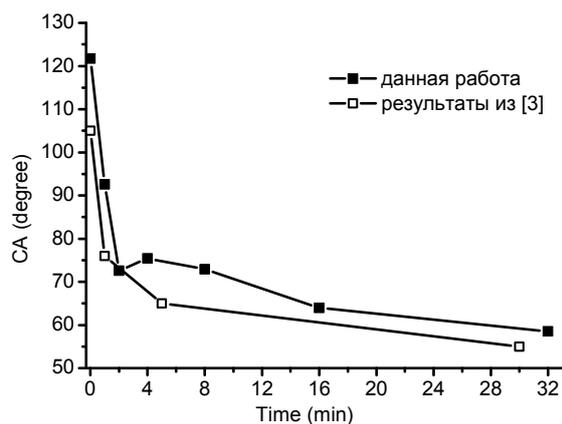
*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 24-73-10039).*

# МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА НИЗКОЧАСТОТНОЙ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМОЙ

С.Я. Хмель<sup>1</sup>, В.А. Пинаев<sup>1</sup>, А.В. Петрова<sup>1</sup>, А.И. Сафонов<sup>1</sup>,  
Е.А. Максимовский<sup>2</sup>, В.С. Суляева<sup>2</sup>, А.Д. Федоренко<sup>2,3</sup>  
<sup>1</sup>ИТ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090  
<sup>2</sup>ИНХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
<sup>3</sup>ЦКП «СКИФ», Кольцово, 630559  
khamel@itp.nsc.ru

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт) – это полимер с высокой химической инертностью и термостойкостью, который находит широкое промышленное применение. Однако плохая смачиваемость и слабая адгезия фторопласта создают значительные проблемы и ограничивают область его возможных применений. Эти проблемы обусловлены низкой поверхностной энергией. Для увеличения поверхностной энергии, а значит, улучшения смачиваемости и усиления адгезии производят активацию поверхности ПТФЭ разными методами, и одним из основных является плазменная обработка [1, 2].

Представлено экспериментальное исследование активации поверхности ПТФЭ в аргоновой индуктивно-связанной плазме с ферромагнитным усилением. В результате воздействия этой плазмы на поверхность фторопласта происходит увеличение смачиваемости при увеличении времени обработки и плотности мощности. Показано, что обработка ПТФЭ при плотности мощности  $0.12 \text{ Вт/см}^3$  в течение 32 мин приводит к уменьшению краевого угла



смачивания (КУС) до  $59^\circ$ . Полученные данные хорошо согласуются с результатами, полученными при обработке ПТФЭ в емкостно-связанной аргоновой плазме [3]. Полученные SEM изображения поверхности и данные профилометрии показывают уменьшение шероховатости поверхности ПТФЭ с увеличением времени обработки. Данные XPS свидетельствуют об обесфторивании поверхности и образовании новых связей: С-О, С-N, а также об отсутствии каких-либо соединений с атомами

металла. Поэтому полученные в этой работе данные по плазменной модификации поверхности фторопласта можно считать свободными от влияния загрязнения атомами металла. Таким образом, показано, что индуктивно-связанная плазма с ферромагнитным усилением подходит для модификации поверхности ПТФЭ с целью увеличения ее смачиваемости, причем плазменная модификация происходит без загрязнения поверхности атомами металла.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№1023032400205-8-2.5.1)*

1. G. Prime // *Polymers*. 2020. V. 12. P. 2295
2. S. Khmel, V. Pinaev, A. Petrova et al. // *Vacuum*. 2026. V. 244. P. 114865.
3. S.R. Kim // *J. Appl. Polym. Sci.* 2000. V. 77. P. 1913.

# АМОΡФНЫЕ ПЛЕНКИ $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{:H}$ , ПОЛУЧЕННЫЕ В ПРОЦЕССЕ PECVD ИЗ ПАРОВ АЛЛИЛОКСИ(ТРИМЕТИЛ)СИЛАНА И ГЕКСАМЕТИЛДИСИЛОКСАНА

М.Н. Чагин, Е.Н. Ермакова, В.Р. Шаяпов, Е.А. Максимовский, М.Л. Косинова  
ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090  
chagin@niic.nsc.ru

Прогресс электроники в значительной степени зависит от успешного решения проблем в области технологии диэлектрических материалов. Пленки  $\text{a-SiO}_x\text{C}_y\text{:H}$  (далее  $\text{SiOCH}$ ) используют как диэлектрик с низким значением диэлектрической постоянной. В данной работе пленки  $\text{SiOCH}$  получены в процессе плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) с использованием в качестве исходных веществ кремнийорганических соединений - аллилокси(триметил)силана  $\text{Me}_3\text{SiOAllyl}$  (АОТМС) и гексаметилдисилоксана  $(\text{Me}_3\text{Si})_2\text{O}$  (ГМДСО), содержащих все необходимые элементы для формирования пленки, при варьировании параметров процесса – температуры осаждения ( $T_{\text{ос}}$ ) и мощности ВЧ-разряда. Гелий использовали как дополнительный газ.

Для характеристики пленок использовали СЭМ, РФЭС, ИК-спектроскопию, эллипсометрию, ЭДС, спектроскопию КРС, ПЭМ и ПЭМВР. Метод оптической эмиссионной спектроскопии позволил определить типы газовых специй, образующихся в газовой фазе в результате плазмохимического разложения прекурсора, и предположить их влияние на состав пленок.

По данным СЭМ пленки сплошные, однородные, без особенностей. Для пленок  $\text{SiOCH}$  получены спектры КРС для установления наличия примесной фазы углерода, что важно контролировать при использовании элементоорганических прекурсоров. Установлено, что в составе пленок, синтезированных при температурах до  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , эта фаза отсутствует.

Определены следующие зависимости: а) количественная связь между скоростью роста пленок  $\text{SiOCH}$  и параметрами процесса; б) взаимосвязь элементного состава пленок, химического строения и условий проведения процесса; в) корреляция функциональных характеристик пленок с условиями осаждения; г) взаимосвязь электрофизических и механических характеристик пленок с их составом и химической структурой. Определено, что для пленок, полученных из ГМДСО, с ростом  $T_{\text{ос}}$  содержание [Si] растет от 20 до 30 ат.%, [C] снижается с 60 до 50 ат.%, при этом [O] примерно постоянно 17-18 ат.%. При разложении АОТМС с ростом  $T_{\text{ос}}$  содержание [Si] и [O] растет с 14 до 24 ат. % и с 18 до 26 ат. % соответственно, а [C] снижается с 60 до 50 ат.%. Мощность ВЧ разряда не оказала существенного влияния на элементный состав пленок. ИК спектры пленок содержат широкую полосу поглощения в области  $800\text{-}1200\text{ см}^{-1}$ , которая является суперпозицией полос, связанных с колебаниями связей Si–C, Si–O–Si, Si–CH<sub>x</sub>–Si. Интенсивность этой полосы растет с  $T_{\text{ос}}$ . Одновременно интенсивность сигналов от водородсодержащих связей Si–CH<sub>3</sub>, Si–H и C–H падает. Увеличение мощности плазмы также снижает содержание этих связей.

На основании измерений вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик МДП структур Si(100)/SiOCH/Al получены зависимости значения диэлектрической проницаемости и напряжения пробоя диэлектриков от условий получения пленок. Определено, что снижение мощности ВЧ-разряда и температуры синтеза способствует получению пленок, содержащих группы Si–CH<sub>3</sub>, что приводит к снижению величины диэлектрической постоянной. Пленки  $\text{a-SiOCH}$  (прекурсор ГМДСО) имеют  $\epsilon=2.40\text{-}2.85$ ,  $E_{\text{пр}}=(3\text{-}7)\times 10^6\text{ В/см}$  и механические свойства  $E=19\text{-}47\text{ ГПа}$ ,  $H=4.2\text{-}9.0\text{ ГПа}$ . Пленки, полученные из АОТМС:  $\epsilon=2.8\text{-}3.5$ ,  $E_{\text{пр}}=1\times 10^5\text{-}5\times 10^6\text{ В/см}$ . Эти характеристики делают их пригодными для использования в качестве межслоевого диэлектрика в современных СБИС.

*Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 23-79-00026, <https://rscf.ru/project/23-79-00026/> с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Национальный центр исследования катализаторов», ИК СО РАН, Новосибирск.*

# ЛЕТУЧИЕ РАЗНОЛИГАНДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ЦИНКА С $\beta$ -ДИКЕТОНАМИ И N,N,N',N'-ТЕТРАМЕТИЛЭТИЛЕНДИАМИНОМ: СИНТЕЗ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

А.А. Шадрина<sup>1,2</sup>, С.И. Доровских<sup>1</sup>, А.М. Макаренко<sup>1</sup>, Д.П. Пищур<sup>1</sup>, Е.С. Викулова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090

<sup>2</sup>НГТУ, ул. просп. Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630073

annashadrina350@gmail.com

Оксид цинка является оптически прозрачным широкозонным полупроводником, его области применения разносторонни и постоянно дополняются [1]. В частности, ZnO перспективен как допант для создания новых эмиссионных материалов. Это обуславливает возрастающий интерес к получению ZnO методом химического осаждения из газовой фазы (MOCVD), поскольку данная технология позволяет формировать тонкие слои с высокой степенью однородности, наночастицы и покрытия с контролируемыми свойствами на материалах различной природы и формы.

Летучие  $\beta$ -дикетонатные комплексы цинка ( $L = RC(O)CHC(O)R'$ ) активно применяются в качестве прекурсоров для MOCVD процессов. Однако,  $\beta$ -дикетонаты  $[ZnL_2]_n$ , склоны к олигомеризации или присоединению воды, что обуславливает возникает необходимость дополнения координационного окружения металла нейтральными лигандами. Так, координация  $[ZnL_2]_n$  с диаминами, такими как tmeda (N,N,N',N'-тетраметилэтилендиамин) предотвращает преждевременное разложение и гидролиз комплексов  $[Zn(tmeda)L_2]$  в сравнении с  $[ZnL_2]_n$  [2,3]. Модификация групп заместителей в  $\beta$ -дикетонатных лигандах открывает дополнительные возможности для управления структурой, летучестью и стабильностью таких соединений. Так, фторированные лиганды (например, при  $R = CF_3$ ), как правило, эффективно повышают летучесть прекурсора, одновременно снижая его температуру плавления. Однако термические свойства разнолигандных комплексов цинка малоизучены, что не позволяет выбирать оптимальные условия паробразования для MOCVD.

Суммируя вышесказанное, настоящая работа посвящена исследованию термических свойств комплексов типа  $[Zn(tmeda)(L)_2]$ . Синтезированы 2 фторированных комплекса ( $L = hfac$  (1,1,1,5,5,5-гексафтор-2,4-пентандионат, известный [2]) и  $L = ptac$  (1,1,1-трифтор-5,5-диметил-2,4-гександионат, новый)), а также нефторированный аналог ( $L = acac$  (2,4-пентандионат, известный [3]) для сравнения. Идентификация соединений проведена методами ЯМР, ИК-спектроскопии и элементного анализа. Методом ДСК впервые изучено термическое поведение комплексов в конденсированной фазе, методом потока – впервые получены температурные зависимости давлений насыщенного пара и рассчитаны термодинамические параметры сублимации/испарения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 24-79-10272.*

[1] Toma F.T.Z., Rahman M.S, Maria K.H. // Discov Mater. 2025. Vol. 5. Art. Nr. 60.

[2] Ni J., Yan H. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2005. Vol. 127(15). P. 5613-5624.

[3] Halz, J.H. // Acta Cryst. 2020. Vol. 76. P. 66-71.

## СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ОРГАНОЗОЛЕЙ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА(III), СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АОТ

Е.А. Зайцева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИИХ СО РАН, пр. Лаврентьева 3, Новосибирск 630090

<sup>2</sup>НГУ, ул. Пирогова 2, Новосибирск 630090

e.zaitseva4@g.nsu.ru

Развитие энергоэффективных технологий микроэлектроники и спинтроники стимулирует поиск новых прекурсоров для синтеза функциональных наноматериалов с заданными магнитными свойствами. Перспективным направлением является использование коллоидных систем на основе оксидов железа, которые после нанесения в виде покрытий могут служить основой магниторезистивных сенсоров и элементов памяти. В данной работе исследованы органозоли оксида железа (III), стабилизированные анионным ПАВ, как модельные системы, сочетающие стабильность в органической среде и потенциал для формирования тонких пленок с контролируемой наноструктурой.

Методом микроэмульсионного синтеза получены стабильные органозоли Fe $\square$ O $\square$ -АОТ. Рентгенофазовый анализ подтвердил, что синтезированные наночастицы являются полиморфными с преобладающей фазой оксида железа (III). Концентрация и диаметр частиц составили 25,1 мкг/мл и 11,9 $\pm$ 0,7 нм соответственно. Для оптической характеристики дисперсий рассчитан коэффициент молярного поглощения, который достиг значения 251,9 л/(моль·см), что подтверждает высокую дисперсность частиц, способных эффективно поглощать свет в видимой области спектра. Полученные золи демонстрировали высокую временную стабильность без признаков коагуляции или седиментации, что является обязательным условием для их использования в технологических процессах для формирования магнитоактивных покрытий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 24-73-00200.*

# ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДИФФУЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР

А.Г. Киселевич<sup>1,2</sup>, Е.А. Соснов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),  
Московский пр., д. 26, Санкт-Петербург, 190013

<sup>2</sup> АО «НИИ «Феррит-Домен», ул. Цветочная, д.25, Санкт-Петербург, 196006  
anastasia.kiselevich@yandex.ru

Диагностика поверхностных структур, в первую очередь, необходима в ходе проведения процессов, затрагивающих изменение тонкого приповерхностного слоя материала. CVD-процессы – технология модифицирования поверхности твердых материалов путем создания на их поверхности новых слоёв и структур. При проведении процесса CVD важно оценить функциональные характеристики получаемых тонких пленок для прогнозирования физико-химических свойств продукта. Одним из актуальных методов исследования и оценки поверхностных слоёв является электронная спектроскопия диффузного отражения (ЭСДО), позволяющая оценить координационное состояние тонкого приповерхностного слоя материала (< 5 нм) [1].

В качестве объекта исследования выбран высокодисперсный порошок  $ZrO_2$ , полученный методом соосаждения из  $ZrO(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ . В ходе исследования был рассмотрен  $ZrO_2$ , подвергнутый термообработке в диапазоне температур 300-1300°C.

По результатам ЭСДО было выявлено наличие цирконийоксидных полиэдров на поверхности исходного материала, соответствующих аморфному состоянию материала, а также полиэдры, отвечающие моноклинной кристаллической фазе  $m-ZrO_2$ . Более того, было установлено наличие спектральных переходов, которые позволили оценить оптическую ширину запрещенной зоны для аморфного (4,7эВ) и моноклинного (5,04-5,08 эВ)  $ZrO_2$ .

$ZrO_2$  обладает собственной вакансионной дефектностью в анионной подрешетке, поэтому для него характерно образование кислородных вакансий при повышении температуры, при этом электроны, оставшиеся в материале, могут вступать во вторичные взаимодействия, локализуясь на свободных кислородных вакансиях и восстанавливая атомы Zr до  $Zr^{4+}$ . В спектре были выделены слабые области поглощения 2,1 эВ и 2,4 эВ, которые, вероятнее всего, относятся к переходу вторичных электронов, «замороженных» в возбужденном состоянии на уровнях с длительным периодом релаксации, например,  $F^+$ -центры. Следует отметить, что появление полосы поглощения 3,45 эВ может быть вызвано не только активацией и закреплением электрона на месте свободной вакансии, но и переносом локализованного на  $F^+$ -центре электрона с восстановлением близкорасположенного  $Zr^{4+}$  до  $Zr^{3+}$ .

*Работа выполнена на базе Первого всероссийского инженерингового центра технологии молекулярного наплавления СПбГТИ(ТУ) (соглашение Министерства образования и науки России №075-15-2021-028).*

1. Малков А.А., Кукушкина Ю.А., Соснов Е.А., Малыгин А.А. // Неорганические материалы. 2020. Т. 56, № 12. С. 1303-1310.

# CVD-МЕТОД ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МЕМБРАННЫХ ПОРИСТЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ КИСЛОРОДНО-УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА

А.С. Полуэктова, К.Ю. Киселев, У.О. Каясова, М.А. Тарасенко,  
М.В. Нешин, А.С. Макаров, В.В. Скудин  
РХТУ им. Д.И. Менделеева, Россия, Москва, Миусская площадь, 9, 125047  
anna.k1020@mail.ru

В промышленности для риформинга природного газа традиционно используют реакторы с неподвижным слоем катализатора. Альтернативным и перспективным способом является использование реакторов с мембранным катализатором, в которых не наблюдаются кинетических (диффузионных) ограничений. Целью данной работы является разработка пористых мембранных катализаторов (МК) для проведения кислородно-углекислотной конверсии метана в данном типе реакторов.

Одним из эффективных подходов к созданию таких катализаторов является химическое осаждение из газовой фазы (CVD-метод) [1]. Он позволяет получить на поверхности мембраны каталитический слой заданного состава.

В качестве пористой подложки использовали трубчатую микрофльтрационную мембрану из  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , на которую в инертной среде при атмосферном давлении осаждали пары карбониллов  $\text{Mo}(\text{CO})_6$  и  $\text{W}(\text{CO})_6$ , полученные сублимацией при  $80^\circ\text{C}$ , с последующим их разложением до оксидов. Элементный состав слоев анализировали методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX).

Для ограничения диффузии паров вглубь мембраны на подложке предварительно сформировали при  $350^\circ\text{C}$  барьерный слой из  $\text{WO}_3$  (1 мас. %). На его поверхности из бинарной смеси карбониллов в соотношении 95:5 (Mo:W) при температуре  $250^\circ\text{C}$  осадили смесь оксидов ( $\text{MoO}_2:\text{WO}_2$ ) с общей массой каталитического слоя 6,1 мас.% [2].

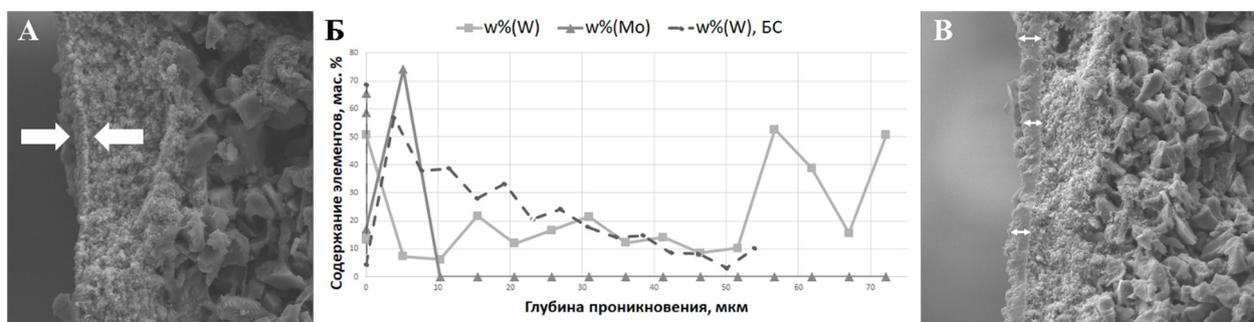


Рис. 1. А – формирование барьерного слоя, Б – распределение элементов по глубине проникновения, В – формирование бинарного каталитического слоя

По результатам EDX установили, что состав каталитического слоя на поверхности 82:18 (Mo:W) отличается от заданного состава карбониллов в парах 95:5, что связано с различием в термической устойчивости –  $\text{Mo}(\text{CO})_6$  разлагался на поверхности (0–10  $\mu\text{m}$ ), а более термически устойчивый  $\text{W}(\text{CO})_6$  проникал и осаждался в глубине пор (рис. 1Б). Для достижения требуемого состава на поверхности нужно снизить проницаемость барьерного слоя для паров вольфрама, повысив массу слоя и температуру его осаждения.

1. В.Г. Сыркин CVD-метод. Химическая парофазная металлизация. М.: Наука, 2000. 496с.
2. В.Р. Кислов, В.В. Скудин, А. Адаму, Д.А. Грунин. Сравнение моно- и биметаллических карбидных катализаторов в реакции углекислотной конверсии метана. Успехи в химии и хим. технологии. 2015, 24, №7.

# ФОРМИРОВАНИЕ СВЕРХСТАБИЛЬНЫХ СТЕКОЛ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ PVD: ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ КАЛОРИМЕТРИИ РАСТВОРЕНИЯ

И.С. Балахонцев<sup>1</sup>, М.И. Ягофаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>К(П)ФУ, Химический институт им. А.М. Бутлерова, ул. Кремлевская, 29, Казань, 420008  
jsyoutub@gmail.com

Сверхстабильные стекла представляют собой особый класс аморфных материалов, характеризующихся большей плотностью, меньшей теплоемкостью и более низкой потенциальной энергией по сравнению со стеклами, полученными охлаждением из расплава [1]. В настоящее время термодинамическая стабильность стекол обычно оценивается по фиктивной температуре [2], определяемой методом ДСК на основе измерения теплоемкости в области расстекловывания. Однако данный подход имеет ряд ограничений, включая холодную кристаллизацию образцов при нагревании и неопределенности, связанные с экстраполяцией теплоемкостей стеклообразного и жидкого состояний, что приводит к неоднозначности определения фиктивных температур.

В данной работе впервые предложен подход к оценке относительной термодинамической стабильности стекол при 298,15 К, полученных осаждением из паровой фазы и охлаждением из расплава, с использованием калориметрии растворения; в качестве объектов исследования выбраны 1,3,5-трис-( $\alpha$ -нафтил)бензол и N,N'-дифенил-N,N'-бис(3-метилфенил)бензидин — органические полупроводники с низкой склонностью к кристаллизации

Стекла указанных веществ получали методом осаждения из газовой фазы на подложку с заданной температурой и путем быстрого охлаждения расплава; относительную термодинамическую стабильность оценивали как разность энтальпий аморфных состояний, определяемую экспериментально по данным калориметрии растворения в бензоле и расчётно с использованием уравнения Кирхгофа на основе теплоемкостей и фиктивных температур по уравнению (1).

$$\Delta_{\text{ст,ОП}}^{\text{ж}} H(T_0) - \Delta_{\text{ст,ОР}}^{\text{ж}} H(T_0) = \int_{T_f(\text{ОП})}^{T_0} \Delta C_{\text{р,м}}^{\text{ж}} dT - \int_{T_f(\text{ОР})}^{T_0} \Delta C_{\text{р,м}}^{\text{ж}} dT = \Delta_{\text{ст,ОП}}^{\text{раст}} H(T_0) - \Delta_{\text{ст,ОР}}^{\text{раст}} H(T_0) \quad (1)$$

где  $\Delta H$  – изменение энтальпии,  $\Delta C_{\text{р,м}}$  – изменение изобарной теплоёмкости,  $T_0 = 298,15$  К,  $T_f$  – фиктивная температура. индекс ж относится к жидкости, ст – к стеклу, ОП соответствует стеклу, осаждённому из паровой фазы, ОР – стеклу, осаждённому из расплава; раст – бесконечно разбавленному раствору.

Энтальпии аморфных тонких пленок, медленно осажденных на холодную подложку, были существенно ниже, чем у охлажденных из расплава стекол, что согласуется с последними исследованиями сверхстабильных стекол.

Результаты исследования подчеркивают перспективность калориметрии растворения как инструмента для изучения термодинамического состояния стекол, быстро кристаллизующихся при нагревании, в том числе сверхстабильных.

1. Swallen S.F., Kearns K.L., Mapes M.K. et al. // Science. 2007. Vol. 315, № 5810. P. 353–356.
2. Moynihan C.T., Eastal A.J., De Bolt M.A., Tucker J. // J. Am. Ceram. Soc. 1976. Vol. 59, № 1–2. P. 12–16.

*Работа выполнена при поддержке РФФ (проект №23-73-10014)*

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРОГРАММА</b>	7
<b>УСТНЫЕ ДОКЛАДЫ</b>	17
<b>Васильева И.Г.</b> ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫРАЩИВАНИЯ СТРУКТУРНО- СОВЕРШЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИ ВАЖНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ	18
<b>Мацкевич Н.И., Шлегель В.Н., Станкус С.В., Семерикова А.Н.</b> СИНТЕЗ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (Mo, W, Co) ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ	19
<b>Манакон А.Ю., Родионова Т.В.</b> ГАЗОГИДРАТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАМКАХ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ СО РАН	20
<b>Мирзаева И.В., Афаунов Р.Э., Козлова С.Г.</b> ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЯЗЕЙ МЕТАЛЛ-ЛИГАНД В ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕКУРСОРАХ МОСVD КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИКИ И СВОЙСТВ	21
<b>Макаренко А.М., Жерикова К.В.</b> ТЕРМОДИНАМИКА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ $\beta$ -ДИКЕТОНАТОВ МЕТАЛЛОВ КАК ОСНОВА КОНТРОЛЯ ИХ ПАРООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССАХ МОСVD	22
<b>Поломских В.С., Дудин А.А., Рудаков Г.А.</b> ХИМИКО-КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ LAFOR ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ РОСТА ПЛЕНКИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА АТОМНО- СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ	23
<b>Жерикова К.В.</b> ФАЗОВАЯ ТЕРМОДИНАМИКА МОСVD ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ НА ПРИМЕРЕ МЕДНЫХ КОМПЛЕКСОВ	24
<b>Доровских С.И., Ятыгин В.А., Сухих А.С., Макаренко А.М., Пищур Д.П., Сысоев С.В., Жерикова К.В., Викулова Е.С.</b> ФТОРИРОВАННЫЕ РАЗНОЛИГАНДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ КОБАЛЬТА(II) ДЛЯ ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ ФТОРИДНЫХ И ОКСИДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ	25
<b>Крисюк В.В.</b> ГЕТЕРОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ БЕТА-ДИКЕТОНАТЫ КАК ПРЕКУРСОРЫ ДЛЯ МОСVD МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПЛЁНОК	26
<b>Уркасым кызы С., Тургамбаева А.Е., Сухих А.С., Сысоев С.В., Игуменов И.К., Крисюк В.В.</b> СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕТУЧИХ БЕТА-ДИКЕТОНАТОВ НИОБИЯ	27
<b>Викулова Е.С., Доровских С.И., Морозова Н.Б.</b> СОВРЕМЕННАЯ ХИМИЯ ЛЕТУЧИХ КОМПЛЕКСОВ ЦИРКОНИЯ И ГАФНИЯ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ОКСИДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ	28

<b>Руденко К.В., Мяконьких А.В., Рогожин А.Е.</b> АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ И СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПЛЕНОК РУТЕНИЯ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В ПЛАНАРНОМ И 3D ВАРИАНТЕ	29
<b>Волошин Б.В., Селезнев В.А., Голяшов В.А.</b> СИНТЕЗ ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДОВ ВАНАДИЯ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННО-СТИМУЛИРОВАННОГО ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ	30
<b>Гудовских А.С., Уваров А.В., Баранов А.И., Вячеславова Е.А., Максимова А.А., Ярчук Э.Я.</b> ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ СЛОЕВ InP	31
<b>Гаджимурадов С.Г., Сулейманов С.И., Абдулагатов И.М., Абдулагатов А.И.</b> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ РЕАКЦИЙ В ПРОЦЕССАХ МН $M_{Cr_x}O_y$ ( $M = Zn, Al, Ti$ )	32
<b>Лукашов В.В., Игуменов И.К., Шутилов Р.А.</b> ДИНАМИКА СУБЛИМАЦИИ МИКРОЧАСТИЦ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ ГАЗА НА ПРИМЕРЕ $Zr(DPM)_4$	33
<b>Петрова А.В., Сафонов А.И.</b> ОСАЖДЕНИЕ ФТОРПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ $NW$ CVD ПРИ РАЗБАВЛЕНИИ ГАЗА-ПРЕДШЕСТВЕННИКА ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ	34
<b>Митулинский А.С., Гайдайчук А.В., Зенкин С.П., Линник С.А.</b> ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК $Al_2O_3$ МЕТОДОМ CVD С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗОПРОПИЛАТА АЛЮМИНИЯ	35
<b>Лебедев М.С.</b> ОСОБЕННОСТИ РОСТА И СТРУКТУРЫ ПЛЕНОК ОКСИДА САМАРИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОПЕРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПАРАМИ ТРИС-ИЗОПРОПИЛЦИКЛОПЕНТАДИЕНИЛА САМАРИЯ (III) И ВОДЫ	36
<b>Стрикалов Е.Д., Волков Д.Ю., Меш М.В., Меш А.М., Кольцов Ю.С.</b> МЕТОДЫ МАСКИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ	37
<b>Александров Н.В., Кириленко Е.П., Горячев А.В., Дудин А.А., Зюзин С.С., Рудаков Г.А.</b> КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК ОКСИДОВ Ti И Hf ПРИ ОТРАБОТКЕ ПРОЦЕССОВ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ	38
<b>Маркелова М.Н., Грабой И.Э., Хафизов А.А., Кауль А.Р.</b> MOCVD МАТЕРИАЛОВ СПИНТРОНИКИ	39
<b>К.Е. Капогузов С.В. Мутилин, С.В. Белая, В.Н. Кичай, Л.В. Яковкина, И.В. Корольков, А.А. Сараев, М.Л. Косинова</b> СТАБИЛЬНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ПЛЕНКАХ $VO_2$ , СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ НАНОСТЕНКАХ h-BCN	40
<b>Хижняк Е.А., Юшина И.В., Лебедев М.С., Шаяпов В.Р.</b> УСТАНОВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ФАЗОВЫМ СОСТАВОМ И ОПТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ В ОКСИДНЫХ СИСТЕМАХ $HfO_2-TiO_2$ И $ZrO_2-TiO_2$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ	41
<b>Рихтер Э.А., Корольков И.В., Игуменов И.К., Викулова Е.С.</b> ИЗУЧЕНИЕ ВТОРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ MOCVD И ALD	42

<b>Исубгаджиев Ш.М., Амашаев Р.Р.</b> РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ СЕРЕБРЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ	43
<b>Милёхин А.Г., Милёхин И.А., Тараненко А.В., Басалаева Л.С., Киселев К., Курусъ Н.Н., Васильев Р.Б., Царев А.В., Дворецкая Л.Н., Чиглинцев Э.О., Чернов А.И., Латышев А.В.</b> ОПТИЧЕСКАЯ НАНОСКОПИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР	44
<b>Семенова О.И.</b> ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПЕРОВСКИТЫ В СОВРЕМЕННОЙ ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ	45
<b>Баранов А.И., Уваров А.В., Вячеславова Е.А., Максимова А.А., Михайлов О.П., Поздеев В.А., Ярчук Э.Я., Гудовских А.С.</b> ЕМКОСТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГЕТЕРОГРАНИЦЫ МЕЖДУ КРЕМНИЕМ И СЛОЯМИ ОКСИДА ГАЛЛИЯ И АЛЮМИНИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ALD	46
<b>Иванова О.К., Божко С.А., Подгорный Д.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОПОРИСТОСТИ СЛОЕВ НИТРИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ	47
<b>Басова Т.В., Бонегардт Д.В., Клямер Д.Д., Сухих А.С.</b> ГАЛОГЕНЗАМЕЩЕННЫЕ ФТАЛОЦИАНИНЫ МЕТАЛЛОВ: ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО СТРОЕНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И СЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК	48
<b>Бонегардт Д.В., Пинчукова Е.П., Сухих А.С., Клямер Д.Д., Басова Т.В.</b> ФОРМИРОВАНИЕ СОКРИСТАЛЛОВ И СМЕШАННЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ТЕТРАФТОРОФТАЛОЦИАНИНА КОБАЛЬТА И НЕЗАМЕЩЕННОГО ФТАЛОЦИАНИНА ЦИНКА	49
<b>Богословцева А.Л., Шаяпов В.Р., Чепкасов С.Ю., Миронова М.И., Капишников А.В., Володин В.А., Марин Д.В., Гейдт П.В.</b> ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ	50
<b>Кузнецов В.А.</b> РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ ПО СОЗДАНИЮ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ	51
<b>Новиков М.А., Попов К.М., Сысоев В.И., Окотруб А.В.</b> ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МЕДНОЙ ФОЛЬГИ НА СТРУКТУРУ И ДЕФЕКТНОСТЬ CVD-ГРАФЕНА	52
<b>Колодин А.Н., Зайцева Е.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ	53
<b>Милюшин Д.М., Капогузов К.Е., Тумашев В.С., Багочус Е.К., Кичай В.Н., Яковкина Л.В., Мугилин С.В.</b> ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ВАНАДИЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ	54

<b>Хафизов А.А., Гу Жосюань, Маркелова М.Н., Волков Д.А., Габриелян Д.А., Сафин А.Р., Васильев А.Л., Кауль А.Р.</b> ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ $\text{Lu}_{3+x}\text{Fe}_{5-x}\text{O}_{12}$ : МОСVD-СИНТЕЗ И ВЗАИМОСВЯЗЬ СОСТАВ-СТРУКТУРА-СВОЙСТВА	55
<b>Белая С.В.</b> СИНТЕЗ СЛОЕВ $\text{BCN}$ , В ТОМ ЧИСЛЕ В СОСТАВЕ КОМПОЗИТОВ, ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ	56
<b>Мокрушин А.С., Дмитриева С.А., Стройкова А.Р., Симоненко Н.П., Симоненко Е.П.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОФАЗНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ ХЕМОРЕЗИСТИВНЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ	57
<b>Дмитриева С.А., Мокрушин А.С., Симоненко Н.П., Симоненко Е.П.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК НА ОСНОВЕ $\text{ZnO}$	58
<b>Бурдина К.П., Аксенов А.Н., Тюньков А.В., Юшков Ю.Г., Андреев О.В.</b> ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ГАЗОФАЗНОГО НАСЫЩЕНИЯ И ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОВ	59
<b>Морозов Г.С.</b> ОПЫТ МАСШТАБИРОВАНИЯ МЕЛКОСЕРИЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ LPCVD ОТ НИОКР ДО ЗАВОДА	60
<b>Васильев В.Ю.</b> CVD ПЛЕНКИ БОРОФОСФОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ИМС, МЭМС, МОЭМС - ОБЗОР	61
<b>Назаров Д.В., Козлова Л.А., Вартиайнен В.В., Годун А.П., Юдинцева Н.М., Максимов М.Ю.</b> АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	62
<b>Ежов И.С., Попович А.А., Максимов М.Ю.</b> ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ОКСИДА НИКЕЛЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ $\text{NiCr}_2$ и $\text{O}_3$	63
<b>Чернышев А.В., Реутова Ю.С., Волошин Н.А., Метелица А.В.</b> ИОНОХРОМИЗМ СПИРОПИРАНОВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ	64
<b>Реутова Ю.С., Чернышев А.В., Волошин Н.А., Метелица А.В.</b> ТОНКИЕ ПЛЕНКИ КОМПЛЕКСОВ СПИРОПИРАНА И $\beta$ -ДИКЕТОНАТОВ МЕТАЛЛОВ: ГАЗОФАЗНЫЙ СИНТЕЗ И СВОЙСТВА	65
<b>Балахнин В.С., Володина Д.В., Подкопаева Е.Д., Балыш З.С., Бочковский С.К., Юдин И.Б.</b> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ В УСТАНОВКЕ ПРОТОЧНО-ВАКУУМНОГО ТИПА УМН-30	66

<b>Шутилов Р.А., Лукашов В.В., Маликов А.Г., Гулов М.А., Аксенов А.Н., Игуменов И.К.</b>	
МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ	67
<b>Седельникова О.В., Городецкий Д.В., Поддубская О.Г., Окотруб А.В.</b>	
УГЛЕРОДНЫЕ МЕТАМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ОПТИКИ	68
<b>Шаяпов В.Р., Хижняк Е.А., Лебедев М.С.</b>	
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛЕНОК $Hf_{1-x}Ti_xO_2$ И $Zr_{1-x}Ti_xO_2$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ	69
<b>Ермакова Е.Н., Косинова М.Л.</b>	
ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ ПРЕКУРСОРА НА СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА PECVD ПЛЕНОК СИСТЕМЫ Si–C–N–O–H	70
<b>Суляева В.С., Косинова М.Л.</b>	
БОРОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ – ПРЕКУРСОРЫ ДЛЯ CVD-СИНТЕЗА АМОРФНЫХ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК VN, VCN И SiVCN	71
<b>СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ</b>	72
<b>Афаунов Р.Э., Мирзаева И.В.</b>	
ОПИСАНИЕ СВЯЗЕЙ МЕТАЛЛ-ЛИГАНД МЕТОДОМ EDA-NOCV	73
<b>Багаматов Г.З., Абдулагатов И.М., Абдулагатов А.И., Максумова А.М., Ашурбеков Н.А., Шабанович Г.Ш., Закарьяева М.З.</b>	
РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПЛАЗМО- СТИМУЛИРОВАННОГО АТОМНО-СЛОЕВОГО НАСЛОЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПЛЁНОК ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	74
<b>Бакунова А.А., Каменева А.Л.</b>	
МИКРОСТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ РОСТА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНОСИМЫХ МЕТОДОМ PVD	75
<b>Борисенко Д.П., Галиуллин А.А., Матиенко Д.А., Досов К.А., Рыбин М.Г.</b>	
CVD ОБОРУДОВАНИЕ С ВНУТРЕННЕЙ НАГРЕВАЕМОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ И ОХЛАЖДАЕМЫМИ СТЕНКАМИ ДЛЯ СИНТЕЗА ГРАФЕНА И ДРУГИХ ДВУМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	76
<b>Бочаров В.В.</b>	
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПЛЕНОК AG-AOT: МЕТОД «DIP-COATING» И МЕТОД CVD	77
<b>Варваринская С.Е., Викулова Е.С., Ильин И.Ю., Сухих Т.С., Пищур Д.П., Крючкова Н.А., Морозова Н.Б., Жеравин А.А.</b>	
СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ Ag(I) с $\alpha, \alpha'$ -БИПИРИДИЛОМ И $\beta$ -ДИКЕТОНАТНЫМИ ЛИГАНДАМИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МОСVD	78
<b>Вячеславова Е.А., Мохов Д.В., Баранов А.И., Гудовских А.С.</b>	
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУР ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ В ПЛАЗМЕ $SF_6/O_2$ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ	79
<b>Горина Д.В., Ильин И.Ю., Сухих Т.С., Подоляко И.А., Викулова Е.С.</b>	
ВЛИЯНИЕ УДЛИНЕНИЯ (ПЕРФТОР)АЛКИЛЬНОЙ ЦЕПИ НА СТРОЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕТУЧИХ $\beta$ -ДИКЕТОНАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ИРИДИЯ(I) С 1,5-ЦИКЛООКТАДИЕНОМ	80

<b>Городецкий Д.В., Седельникова О.В., Федосеева Ю.В., Лисица Е.В., Зимин М.А., Ерофеев Р.С., Федоренко А.Д., Гусельников А.В., Окотруб А.В.</b> ДЕТЕКТИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО И ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК	81
<b>Дамыров У.М., Гаджимурадов С.Г., Абдулагатов И.М.</b> РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ТЕРМИЧЕСКОГО АТОМНО- СЛОЕВОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ	82
<b>Дациев А.С., Гаджимурадов С.Г., Сулейманов С.И., Дамыров У.М., Максумова А.М., Абдулагатов И.М., Абдулагатов А.И.</b> ПОВЕРХНОСТНАЯ ХИМИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ $\text{CrO}_2\text{Cl}_2$ С $\text{Zn}(\text{Et})_2$ И $\text{Al}(\text{Me})_3$ В ПРОЦЕССАХ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАСЛАИВАНИЯ	83
<b>Етмишева С.С., Максумова А.М., Абдулагатов И.М.</b> ТЕРМИЧЕСКОЕ АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ СМЕШАННЫХ АЛЮМИНИЙ-МОЛИБДЕНОВЫХ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ $\text{AlCl}_3$ , $\text{MoO}_2\text{Cl}_2$ и $\text{H}_2\text{O}$	84
<b>Калинина В.Б., Капогузов К.Е., Азаров И.А., Гайдук А.Е., Кичай В.Н., Яковкина Л.В., Мутилин С.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В CVD-СИНТЕЗИРОВАННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ МЕТОДАМИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ	85
<b>Камдина Т.А., Бонегардт Д.В., Клямер Д.Д.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ОКТАХЛОРЗАМЕЩЕННЫХ ФТАЛОЦИАНИНОВ МЕТАЛЛОВ КАК АКТИВНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ХЕМОРЕЗИСТИВНЫХ СЕНСОРОВ АММИАКА	86
<b>Кочелаков Д.В., Викулова Е.С., Куратьева Н.В., Сысоев С.В., Каюмова Д.Б., Малкерова И.П., Алиханян А.С.</b> ПОЛУЧЕНИЕ ЛЕТУЧИХ КОМПЛЕКСОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПРИМЕРЕ $\beta$ -ДИКЕТОНАТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ КАЛИЯ	87
<b>Крутских С.С., Викулова Е.С., Савков Б.Ю., Афонин М.Ю., Пищур Д.П., Зеленина Л.Н.</b> ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕТУЧИХ АЛКИЛАМИДОВ ГАФНИЯ (IV) – ПРЕКУРСОРОВ ДЛЯ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ	88
<b>Лисица Е.В., Панфилова А.Д., Федосеева Ю.В., Загузина А.А., Окотруб А.В., Булушева Л.Г.</b> ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ СТРУКТУРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОРИСТОГО УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА, ДОПИРОВАННОГО АЗОТОМ, И ЕГО ПОВЕДЕНИЕМ В ЛИТИЙ-ИОННОМ КОНДЕНСАТОРЕ	89
<b>Максимова А.А., Вячеславова Е.А., Баранов А.И., Уваров А.В., Михайлов О.П., Поздеев В.А., Ярчук Э.Я., Гудовских А.С.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ СЛОЕВ $\text{MoO}_x$ ДЛЯ ПАССИВАЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ	90
<b>Максумова А.М., Гафурова М.Н., Гаджимурадов С.Г., Абдулагатов А.И., Абдулагатов И.М.</b> АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ НАНОПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ТИТАНА, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ МЕТАЛЛОВ, НА ПОВЕРХНОСТЬ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МНОГОРАЗОВЫХ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ ВОДЫ	91

<b>Митулинский А.С., Гайдайчук А.В., Зенкин С.П., Линник С.А.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАЛЬНЕГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРЯДКА В СТРУКТУРЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ CVD-АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК	92
<b>Первухина Н.В., Байдина И.А., Громилов С.А.</b> КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ Ir(I) И Ir(III) С $\beta$ -ДИКЕТОНАТ-ИОНАМИ	93
<b>Пигалина У.Ю., Аксенова М.А., Рихтер Э.А., Кочелаков Д.В., Викулова Е.С.</b> СИНТЕЗ, СТРОЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСОВ ТРИФТОРАЦЕТИЛАЦЕТОНАТА МАГНИЯ С 2,2'-БИПИРИДИНОМ И 1,10-ФЕНАНТРОЛИНОМ	94
<b>Плеханов А.Г., Ермакова Е.Н., Шаяпов В.Р., Максимовский Е.А., Косинова М.Л.</b> РОЛЬ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ В УПРАВЛЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ PECVD ПЛЕНОК SiOCH	95
<b>Рябов В.О., Андрищенко В.А.</b> РАЗРАБОТКА МТР ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ CVD СИНТЕЗА ГРАФЕНА	96
<b>Сартакова А.В., Сысоев С.В., Макаренко А.М., Викулова Е.С., Жерикова К.В., Жеравин А.А.</b> ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ $\beta$ -ДИКЕТОНАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ МЕДИ(II) И ИНДИЯ(III) ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И СОВМЕСТНОГО ОСАЖДЕНИЯ В МОСVD-ПРОЦЕССАХ	97
<b>Серова Ю.В., Стригуновская А.В., Рихтер Э.А., Кочелаков Д.В., Сухих А.А., Викулова Е.С.</b> ЛЕТУЧИЕ РАЗНОЛИГАДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ МАГНИЯ: ВЛИЯНИЕ НЕФТОРИРОВАННОГО $\beta$ -ДИКЕТОНАТА НА СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА	98
<b>Ситчихин Б.А., Савков Б.Ю., Ильин И.Ю., Сухих А.С., Пищур Д.П., Викулова Е.С.</b> N-МЕТОКСИМЕТИЛПРОПАНАМИДАТ ГАФНИЯ (IV): НОВЫЙ ЛЕТУЧИЙ ПРЕКУРСОР ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ СЛОЕВ HfO <sub>2</sub>	99
<b>Стригуновская А.В., Рихтер Э.А., Виноградова К.А., Кочелаков Д.В., Сухих А.С., Викулова Е.С.</b> КОМПЛЕКСЫ МАГНИЯ С НЕФТОРИРОВАННЫМИ $\beta$ -ДИКЕТОНАМИ: ВЛИЯНИЕ АРОМАТИЧЕСКОГО НЕЙТРАЛЬНОГО ЛИГАНДА НА СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА	100
<b>Урбах А.А., Зеленина Л.Н., Ермакова Е.Н.</b> ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИНИЛМЕТИЛДИЭТОКСИСИЛАНА	101
<b>Ю.В. Федосеева, В.И. Сысоев, Г.И. Семушкина, С.А. Лаврухина, Е.В. Лисица, О.А. Гурова, Е.А. Максимовский, Л.Г. Булушева, А.В. Окотруб</b> МОДИФИКАЦИЯ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ТЕТРАЦИАНОХИНОДИМЕТАНОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМПУЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГАЗОВ	102
<b>Хмель С.Я., Пинаев В.А., Петрова А.В., Сафонов А.И., Максимовский Е.А., Суляева В.С., Федоренко А.Д.</b> МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА НИЗКОЧАСТОТНОЙ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМОЙ	103
<b>Чагин М.Н., Ермакова Е.Н., Шаяпов В.Р., Максимовский Е.А., Косинова М.Л.</b> АМОРФНЫЕ ПЛЕНКИ SiO <sub>x</sub> C <sub>y</sub> :H, ПОЛУЧЕННЫЕ В ПРОЦЕССЕ PECVD ИЗ ПАРОВ АЛЛИЛОКСИ(ТРИМЕТИЛ)СИЛАНА И ГЕКСАМЕТИЛДИСИЛОКСАНА	104

<b>Шадрина А.А., Доровских С.И., Макаренко А.М., Пищур Д.П., Викулова Е.С.</b> ЛЕТУЧИЕ РАЗНОЛИГАНДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ЦИНКА С $\beta$ -ДИКЕТОНАМИ И N,N,N',N'-ТЕТРАМЕТИЛЭТИЛЕНДИАМИНОМ: СИНТЕЗ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	105
<b>Зайцева Е.А.</b> СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ОРГАНОЗОЛЕЙ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА(III), СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АОТ	106
<b>Киселевич А.Г., Соснов Е.А.</b> ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДИФФУЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР	107
<b>Полужктова А.С., Киселев К.Ю., Каясова У.О., Тарасенко М.А., Нешин М.В., Макаров А.С., Скудин В.В.</b> CVD-МЕТОД ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МЕМБРАННЫХ ПОРИСТЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ КИСЛОРОДНО-УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА	108
<b>Балахонцев И.С., Ягофаров М.И.</b> ФОРМИРОВАНИЕ СВЕРХСТАБИЛЬНЫХ СТЕКОЛ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ PVD: ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ КАЛОРИМЕТРИИ РАСТВОРЕНИЯ	109
<b>СОДЕРЖАНИЕ</b>	110



ЛАБОРАТОРНОЕ ПРОСТРАНСТВО БУДУЩЕГО

## ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ Европа, Китай, Россия

- Предоставление гарантии
- Участие в тендерах
- Проведение пуско-наладочных работ
- Гибкие условия оплаты
- Офисы продаж в Москве и Томске



## ПРОЦЕСС-ТЕРМОСТАТЫ

Официальный представитель SCIENTZ

- Технический консалтинг
- Экспертный подход
- Индивидуальные проекты
- Гарантия 2 года
- Сервисный центр в России



**Мы стремимся быть надежным партнером и обеспечивать качественный клиентский сервис.**



**8 (800) 600 59 64**  
**labspace@labspace.pro**  
**labspace.pro**



# GRAULAB

ЛАБОРАТОРНАЯ МЕБЕЛЬ

- ▶ **19 лет опыта в области оснащения лабораторий**
- ▶ **Комплексные решения от проекта до сборки**
- ▶ **Сделаем всю бумажную работу за вас**
- ▶ **Готовность к нестандартным решениям**
- ▶ **Подробное техническое описание**
- ▶ **Опыт работы с 44 и 223 ФЗ**
- ▶ **Оперативное взаимодействие**
- ▶ **Выгодная логистика**
- ▶ **Бесплатные 2D и 3D проекты**



**8-961-096-00-70**



**info@graulab.ru**



**graulab.ru**

Компания «Вилитек» — российский производитель и поставщик лабораторного, испытательного и промышленного оборудования, включая решения для высокотехнологичных исследований и производств, включая решения для процессов CVD, ALD и PVD.

Мы являемся эксклюзивным представителем в России, Белоруссии и Казахстане ряда ведущих международных производителей установок и аналитических систем для газофазных технологий.

В области химического осаждения из газовой фазы (CVD) особое внимание уделяется разработке, оптимизации и масштабированию технологических процессов, а также контролю параметров осаждения и свойств получаемых покрытий и структур.

Вилитек предлагает комплексные решения, среди которых:



### ▶ ПЕРЧАТОЧНЫЕ БОКСЫ РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Более 10 лет компания Вилитек производит перчаточные боксы с системой газоочистки до 1 ppm по кислороду и влаге, обеспечивающие контролируемую атмосферу для работы с электролитами, растворителями и активными металлами.



### ▶ ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК VLT-CVD

Специализированные установки CVD (HFCVD и MPCVD) предназначены для синтеза алмазных, алмазоподобных и 2D-материалов с точным контролем температуры, давления и состава газовой среды.



### ▶ ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ И РАССЕВ

- Шаровые и планетарные мельницы
- Струйные и ударные мельницы
- Ситовые анализаторы



### ▶ ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ ДЛЯ СИНТЕЗА ПРЕКУРСОРОВ VILITEK VSR

Металлические реакторы предназначены для синтеза газообразных прекурсоров и подготовки летучих металлоорганических соединений.



### ▶ ТРУБЧАТЫЕ И ВАКУУМНЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ОТЖИГА И ТЕРМООБРАБОТКИ



### ▶ ВАКУУМ И ДЕЗАГАЗАЦИЯ

- Вакуумные сушильные шкафы
- Мембранные насосы



### ▶ И ДРУГОЕ, В ТОМ ЧИСЛЕ НЕСТАНДАРТНОЕ, ЛАБОРАТОРНОЕ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Москва, Осталовский проезд,  
д. 5, строение 6.  
Тел.: +7 495 191-35-50.  
E-mail: [info@vilitek.ru](mailto:info@vilitek.ru).

Приглашаем вас ознакомиться с нашими решениями на сайте <https://vilitek.ru> и обсудить возможности сотрудничества!





**<https://ect-center.com/>**

Инжиниринговый химико-технологический центр, г. Томск объединяет экспериментальную науку, новые химические технологии и методы анализа данных для быстрого и эффективного решения задач бизнеса.

Мы готовы оперативно и качественно проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, технологический аудит предприятия и проекта, компьютерное моделирование технических процессов и аппаратов, оптимизацию производства, разработку катализаторов и сорбентов, маркетинговые и патентные исследования, организовать опытное производство химических соединений, решать задачи сопровождения фармацевтических разработок.

Оказываем полный комплекс инжиниринговых услуг: от научно-исследовательских работ до разработки исходных данных на производство.

МИССИЯ ИНЖИНИРИНГОВОГО ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕНТРА — ОБЕСПЕЧИВАТЬ ВЫСОЧАЙШИЙ УРОВЕНЬ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАУКИ.

Научное издание

**Кузнецовские чтения-2026**  
**Восьмой семинар по проблемам**  
**химического осаждения**  
**из газовой фазы**

**2 – 4 февраля 2026 года**

**ПРОГРАММА И СБОРНИК ТЕЗИСОВ**

Ответственный за выпуск  
к.х.н. Косинова Марина Леонидовна

Подписано к печати и в свет 24.02.2026.  
Формат 60x84/8. Печ. л. 14,4. Уч.-изд. л. 14,9.  
Тираж 100 экз. Заказ 31.  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения РАН.  
Просп. Акад. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090