

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХЛОРИДА АЛЮМИНИЯ И ВОДЫ
МЕТОДОМ КВАРЦЕВОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКРОВЗВЕШИВАНИЯ**

С.С. Етмишева, А.М. Максумова, Г.Р. Низамеева, К.В. Холин, И.М. Абдулагатов

София Сейпуллаевна Етмишева (ORCID 0009-0005-3443-8558)*

Кафедра физической и органической химии, Дагестанский государственный университет, ул. М. Гаджиева, 43-а, Махачкала, Российская Федерация, 367000

E-mail: sophi05@yandex.ru*

Абай Маликовна Максумова (ORCID 0000-0002-4384-1884), Ильмутдин Магомедович Абдулагатов (ORCID 0000-0002-6299-5280)

Кафедра физической и органической химии, Дагестанский государственный университет, ул. М. Гаджиева, 43-а, Махачкала, Российская Федерация, 367000

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики - филиал Объединенного института высоких температур РАН, пр. И. Шамиля, 39 «а», Махачкала, Российская Федерация, 367030

E-mail: abay.maksumova2016@yandex.ru, ilmutdina@gmail.com

Гулия Ривалевна Низамеева (ORCID 0000-0002-4991-0502), Кирилл Владимирович Холин (ORCID 0000-0003-2551-5505)

Кафедра физики, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, 68, Казань, Российская Федерация, 420015

E-mail: guliya.riv@gmail.com, kholin06@mail.ru

*Исследован процесс термического атомно-слоевого осаждения (АСО) тонких пленок оксида алюминия с использованием в качестве прекурсоров хлорида алюминия ($AlCl_3$) и воды (H_2O) методом кварцевого пьезоэлектрического микровзвешивания (КПМ) при температуре 150 °С в режиме *in situ*. Результаты получены при следующих временных параметрах для одного цикла: время напуска хлорида алюминия и воды составляет 1 с, а время продувки после напуска каждого прекурсора – 30 с. Установлен линейный рост пленки с количеством АСО циклов. Показано, что поверхностные реакции в процессе роста пленок имели самоограничивающийся характер. По данным КПМ установлено, что после напуска хлорида алюминия прирост массы составляет 35 нг/см², а после напуска воды потеря массы составляет 4 нг/см², что указывает на замещение хлор-ионов ($-Cl$)_x на гидроксильные ($-OH$)_x группы. Результирующий прирост массы в процессе АСО оксида алюминия в среднем за цикл составляет 31 нг/см², что соответствует постоянной роста ~1,03 Å. Рост пленки оксида алюминия происходит в субмонослойном режиме, в процессе реакции $AlCl_3$ с гидроксильной поверхностью в основном наблюдается бидентантное присоединение по вицинальным гидроксильным группам. Также был проведен *ex situ* анализ полученных пленок оксида алюминия с использованием спектроскопической эллисометрии (СЭ) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Данные СЭ показывают, что толщина АСО Al_2O_3 пленки составила 8,36 нм. Результаты РФЭС указывают на содержание в составе пленки примеси хлора в количестве 2,8 ат. %.*

Ключевые слова: молекулярное наслаивание, атомно-слоевое осаждение, оксид алюминия, хлорид алюминия, кварцевое пьезоэлектрическое микровзвешивание

INVESTIGATION OF THE ATOMIC LAYER DEPOSITION OF ALUMINUM OXIDE USING AlCl_3 AND H_2O BY QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE

S.S. Etmisheva, A.M. Maksumova, G.R. Nizameeva, K.V. Kholin, I.M. Abdulagatov

Sofiya S. Etmisheva (ORCID 0009-0005-3443-8558)*

Department of Physical and Organic Chemistry, Dagestan State University, M. Gadzhiev st., 43-a, Makhachkala, 367000, Russia

E-mail: sophi05@yandex.ru*

Abay M. Maksumova (ORCID 0000-0002-4384-1884), Ilmutdin M. Abdulagatov (ORCID 0000-0002-6299-5280)

Department of Physical and Organic Chemistry, Dagestan State University, M. Gadzhieva st., 43-a, Makhachkala, 367000, Russia

Institute for Geothermal Research and Renewable Energy of the Joint Institute for High Temperatures of the RAS, I. Shamilya ave., 39 «a», Makhachkala, 367030, Russia

E-mail: abay.maksumova2016@yandex.ru, ilmutdina@gmail.com

Guliya R. Nizameeva (ORCID 0000-0002-4991-0502), Kirill V. Kholin (ORCID 0000-0003-2551-5505)

Department of Physics, Kazan National Research Technological University, K. Marks st., 68, Kazan, 420015, Russia

E-mail: guliya.riv@gmail.com, kholin06@mail.ru

The thermal atomic layer deposition (ALD) of aluminum oxide thin films using aluminum chloride (AlCl_3) and water (H_2O) as precursors was studied in situ using quartz crystal microbalance (QCM) at 150 °C. The results were obtained with the following time parameters for one cycle: the aluminum chloride and water dose time was 1 s, and the purging time was 30 s. Linear film growth was observed with increasing number of ALD cycles. Surface reactions during film growth were shown to be self-limiting. According to QCM, the mass gain after the dosing of aluminum chloride was 35 ng/cm², while the mass loss after the dosing of water was 4 ng/cm², indicating the substitution of chlorine ions ($-\text{Cl}$)_x with hydroxyl ($-\text{OH}$)_x groups. The resulting mass gain during the ALD of aluminum oxide averages 31 ng/cm² per cycle, corresponding to a growth rate of ~1.03 Å. The aluminum oxide film grows in a submonolayer regime, with bidentate addition at the vicinal hydroxyl groups primarily observed during the reaction of AlCl_3 with the hydroxylated surface. Ex situ analysis of the resulting aluminum oxide films was also performed using spectroscopic ellipsometry (SE) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). SE data indicate that the thickness of the ALD Al_2O_3 film was 8.36 nm. XPS results indicate a chlorine impurity content of 2.8 at.% in the film composition.

Keywords: molecular layering, atomic layer deposition, aluminum oxide, aluminum chloride, quartz crystal microbalance

Для цитирования:

Етмишева С.С., Максумова А.М., Низамеева Г.Р., Холин К.В., Абдулагатов И.М. Исследование процесса атомно-слоевого осаждения оксида алюминия с использованием хлорида алюминия и воды методом кварцевого пьезоэлектрического микровзвешивания. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2026. Т. 69. Вып. 9. С. 89–97. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.6910.

For citation:

Etmisheva S.S., Maksumova A.M., Nizameeva G.R., Kholin K.V., Abdulagatov I.M. Investigation of the atomic layer deposition of aluminum oxide using AlCl_3 and H_2O by quartz crystal microbalance. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2026. V. 69. N 9. P. 89–97. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.6910.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени технология получения тонких функциональных пленок, основанная

на принципах атомно-слоевого осаждения, известного в зарубежной литературе под названием atomic layer deposition (ALD), является одним из динамично развивающихся направлений. Главным локомоти-

вом развития данной технологии является миниатюризация в микроэлектронике. Под названием молекулярное наслаивание (МН) данная технология была разработана в начале 60-х г. прошлого столетия советскими учеными С.И. Кольцовым и В.Б. Алесковским [1-5]. Метод основан на последовательном наращивании монослоев структурных единиц заданного химического состава и строения на поверхности твердофазной матрицы за счет протекания химических реакций между функциональными группами твердого тела и подводимыми к ним реагентами в условиях максимального удаления от равновесия [4]. К основным преимуществам данного метода относятся прецизионный контроль состава и толщины получаемых пленок, их однородность, хорошая адгезия пленки [5].

АСО Al_2O_3 применяется для поверхностной пассивации точечно контактирующих задних поверхностей высокоэффективных солнечных элементов [6], барьера газовой диффузии [7] или защиты от коррозии [8], в качестве диэлектрического и ионно-барьерного слоя в электролюминесцентных панелях [9], блокирующего слоя во флэш-накопителях [10], сенсоров влажности емкостного типа [11], при изготовлении механических осцилляторов для увеличения жесткости их структуры [12], в качестве затравочного слоя для последующего АСО различных молекул с целью изменения функциональных свойств поверхности [13, 14], в качестве покрытий для отвода зарядов в микрооптических электронных системах в сочетании с проводящими компонентами для прототипа инструмента электронной лучевой литографии, что позволяет получать изображения с высоким разрешением электронного луча без артефактов заряда [15], а также в роли инертного носителя для нанесения активного компонента в каталитических системах гидродесульфуризации нефти и нефтепродуктов [16].

Для осаждения тонких пленок оксида алюминия в качестве источника (прекурсора) алюминия использовали хлорид (AlCl_3) или бромид алюминия (AlBr_3), различные алкилпроизводные (AlMe_3 , AlEt_3), алкоксиды ($\text{Al}(\text{OEt})_3$, $\text{Al}(\text{OPr})_3$), алкаламиды ($\text{Al}(\text{NMe}_2)_3$, $\text{Al}(\text{NEt}_2)_3$, $\text{Al}(\text{NPr}_2)_3$ амидинаты $\text{Al}(\text{OSMe}_2\text{CH}_2\text{OMe})_3$ и смешаннолигандные соединения типа AlMe_2Cl , $\text{Al}(\text{OR})_x\text{R}'_y$ в комбинации с водой (H_2O), кислородом (O_2), озоном (O_3), пероксидом водорода (H_2O_2) в качестве источника кислорода [17]. Наиболее изученным и широко используемым процессом в АСО Al_2O_3 является процесс с использованием триметилалюминия (ТМА, $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) и воды в качестве прекурсоров. ТМА обладает такими преимуществами, как термическая

стабильность, высокая летучесть и реакционная способность, что отражается выгодной термохимией процесса реакции с водой $2\text{Al}(\text{CH}_3)_3 + 3\text{H}_2\text{O}_{(г)} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{CH}_{4(г)}$ ($\Delta G(150^\circ\text{C}) = -1182,91 \text{ кДж}$) [HSC 9.0]. Несмотря на перечисленные достоинства, использование ТМА в промышленных масштабах высокочастотн, и в качестве альтернативного прекурсора в АСО часто применяется хлорид алюминия [18], который так же, как и ТМА, является димером в твердой и газовой фазах при температурах до 400°C [19]. Также оба прекурсора являются кислотами Льюиса, однако их кислотность значительно различается: AlCl_3 является более сильной кислотой Льюиса, чем ТМА, что подтверждается значениями глобального индекса электрофильности (ГИЭ) – прямым показателем кислотности Льюиса, 2,75 и 1,65 соответственно [20]. Кислотность Льюиса напрямую связана с реакционной способностью прекурсоров в процессе АСО, то есть повышенная кислотность обуславливает большую вероятность адсорбции прекурсора на поверхности подложки, но увеличивает время его продувки [20].

В работах [18, 20-27] были получены пленки АСО Al_2O_3 с использованием $\text{AlCl}_3/\text{H}_2\text{O}$ при различных температурах: минимальная температура осаждения составляла 80°C [26], а максимальная – 800°C [25], но в основном процессы изучались в диапазоне $200\text{-}300^\circ\text{C}$. С привлечением различных известных физико-химических подходов изучены различные характеристики для них, в том числе такие как постоянная роста за цикл, оптимальная температура роста пленки, элементный состав и свойства полученных пленок.

Несмотря на проведение процесса АСО Al_2O_3 , механизм роста пленки с использованием AlCl_3 и H_2O недостаточно изучен. Целью данной работы является исследование поверхностных реакций с использованием хлорида алюминия и воды методом кварцевого пьезоэлектрического микро-взвешивания.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

АСО пленок проводили на вакуумной установке ООО АСО НаноТех (г. Махачкала, Россия). Вакуумная АСО установка оборудована реакционной камерой с горячими стенками и продувается потоком газа-носителя. В качестве газа-носителя использовали азот особой степени чистоты от ООО «Гермес-газ» (N_2 , 99,999%). С помощью регулятора расхода газа (РРГ) давление в реакторе поддерживали азотом на уровне $\sim 1,0$ Торр. При этом РРГ устанавливали на расход в $100 \text{ см}^3/\text{мин}$. AlCl_3 перед экспериментом загружали в стальной контейнер в

атмосфере аргона. Чистота AlCl_3 (Acros Organics, кат. номер 7446700) составляла 99,0%. Бидистиллированную воду, использованную в качестве второго прекурсора, предварительно деионизировали и дегазировали. АСО проводили при температуре реакционной камеры 150 °С. Во время АСО AlCl_3 грели до 150 °С для сублимации и достижения достаточного давления паров. Температура плавления AlCl_3 составляет 180 °С [28].

Изучение процесса роста пленки проводили в режиме реального времени (*in situ*) с помощью кварцевых пьезоэлектрических микровесов (КПМ), встроенных в реакционную камеру АСО установки. КПМ-оборудование, использованное в данной работе, схоже с описанным в работе [29]. КПМ-измерения выполняли с использованием электронного модуля STM-2 (Inficon). Разрешение кварцевых микровесов по массе составляет $\sim 0,3$ нг/см². До начала процесса осаждения кристалл КПМ покрывали пленкой АСО Al_2O_3 с толщиной ~ 30 –50 Å, для этого использовали ТМА и воду. ТМА с чистотой 97% (Sigma-Aldrich, кат. номер 257222) использовали при комнатной температуре без нагрева.

Значения погрешностей, полученные для каждой точки на кривых насыщения, представляют разброс данных по 10 точкам для разных экспериментов.

Время напуска и продувки прекурсоров во время одного АСО цикла Al_2O_3 обозначали как $t_1/t_2/t_3/t_4$, где t_1 – время напуска паров AlCl_3 ; t_2 и t_4 – время продувки; t_3 – время напуска паров H_2O . Парциальные давления AlCl_3 и H_2O при времени напуска в течение 1 с составляли 75 и ~ 50 мТорр соответственно.

Для определения толщины полученных тонких пленок использовали спектроскопический эллипсометр (СЭ) Film Sense. Эллипсометрические измерения начинали с создания «сэндвич»-модели: подложка – $\text{Si}\langle 100 \rangle$, первый слой – естественный оксид кремния толщиной 25 Å, второй слой – аморфный оксид алюминия толщиной 50 Å, третий слой – модель Cauchy.

Для исследования элементного состава полученных пленок использовали рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС). РФЭС спектры для определения состава получали с использованием комплексного спектрометра ThermoFisher Scientific Escalab 250Xi, снабженного монохроматическим $\text{Al K}\alpha$ рентгеновским источником (1486,6 эВ). Измерения проводились при комнатной температуре в условиях сверхвысокого вакуума порядка $1 \cdot 10^{-9}$ мбар. Энергия пропускания для

обзорных спектров составляет 100,0 эВ с шагом сканирования 0,5 эВ. Калибровка всех спектров была выполнена по пику C 1s с центром при 284,8 эВ. Для нейтрализации заряда образца использовали анионно-электронную систему компенсации заряда. Разложение спектральных фотоэлектронных линий проводили функцией Гаусса, фоновую составляющую вычитали методом Ширли.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

a) In situ анализ с использованием КПМ

Рост пленки оксида алюминия за счет циклически повторяющихся поверхностных реакций паров AlCl_3 и H_2O схематически представлен на рис. 1.

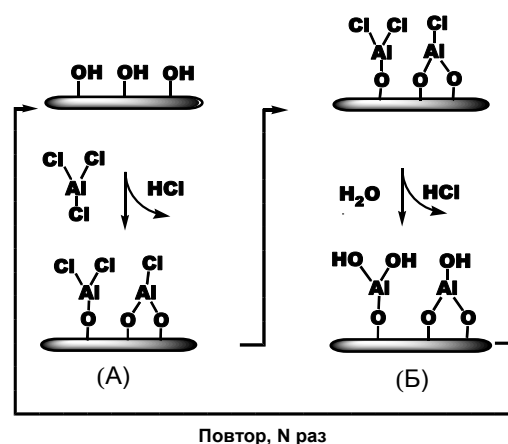
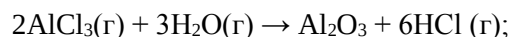


Рис. 1. Схема АСО Al_2O_3 с использованием AlCl_3 и H_2O
Fig. 1. Scheme of the ALD Al_2O_3 using AlCl_3 and H_2O

По представленной выше схеме после напуска AlCl_3 на поверхности образуется монослой алюминийхлоридных групп, а напуск паров H_2O вызывает замещение хлор-ионов на гидроксильные группы, что приводит к регенерации поверхностных функциональных групп, благодаря которым происходит дальнейший рост пленки.

Возможность образования оксида алюминия путем гидролиза хлорида алюминия можно оценить по значению энергии Гиббса:



$$\Delta G(150\text{ °C}) = -309,68 \text{ кДж/моль}$$

Как показывает термодинамический расчет, процесс протекает самопроизвольно при данных условиях. Данная реакция менее выгодна по сравнению с реакцией ТМА и H_2O .

На рис. 2 приведены КПМ-данные зависимости прироста массы от времени осаждения в процессе АСО Al_2O_3 при 150 °С. Время напуска AlCl_3 и

H_2O составляет 1 с, а время продувки – 30 с. В установившемся режиме формирования наблюдается хорошо воспроизводимый линейный рост пленки. Данный процесс характеризуется относительно коротким нуклеационным периодом.

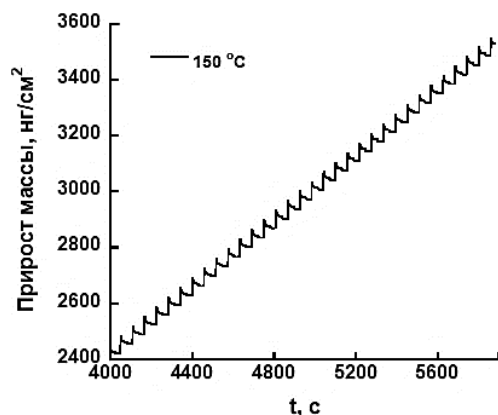


Рис. 2. Прирост массы в процессе АСО Al_2O_3 в установившемся режиме формирования пленки

Fig. 2. Mass gain during ALD of Al_2O_3 in the steady-state film formation regime

Для определения самонасыщаемости поверхностных реакций А и Б была исследована зависимость прироста массы за цикл от длительности напуска прекурсоров (рис. 1). Результаты для хлорида алюминия были получены при временных параметрах одного цикла $\alpha/30/2/30$, где α – варьируемое время напуска паров AlCl_3 , 2 с – фиксированное время напуска паров H_2O ; 30 с – время продувки прекурсоров. Результаты для воды были получены аналогичным способом, используя временные параметры одного цикла $2/30/\alpha/30$, где α – варьируемое время напуска паров H_2O , 2с – фиксированное время напуска паров AlCl_3 .

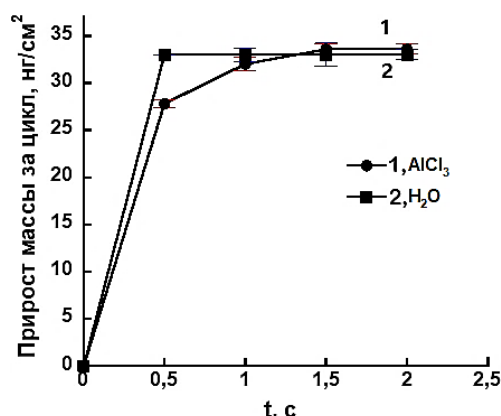


Рис.3. Зависимость прироста массы от длительности напуска паров AlCl_3 (кривая 1) и H_2O (кривая 2) в процессе АСО Al_2O_3 при 150 °C

Fig. 3. Dependence of the mass gain on the duration of dose time of AlCl_3 (curve 1) and H_2O (curve 2) in the Al_2O_3 ALD at 150 °C

Из рис. 3 видно, что кривая насыщения для хлорида алюминия имеет более плавный характер и прирост массы за цикл достигает насыщения при напуске паров AlCl_3 в течение 1,5 с. Для воды этот процесс также имеет самоограничивающийся характер, и прирост массы за цикл достигает насыщения уже при напуске паров H_2O в течение 0,5 с.

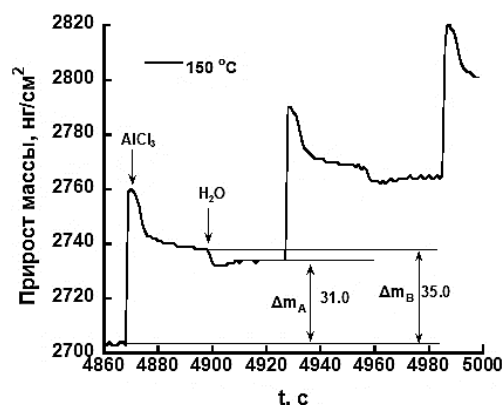


Рис. 4. КПМ данные прироста массы в зависимости от времени (приблизенный вид)

Fig. 4. QCM data on mass gain over time (approximate view)

На рис. 4 представлен наблюдаемый при 150 °C приближенный вид сигнала КПМ в ходе АСО Al_2O_3 с параметрами цикла 1/30/1/30. При напуске AlCl_3 наблюдается прибавка массы, и результирующий прирост массы после продувки составил 35,0 нг/см² (Δm_B). На стадии продувки происходит некоторое снижение массы, что свидетельствует о нестабильности поверхностных комплексов и/или о медленной десорбции продуктов реакции. Напуск H_2O приводит к резкому снижению массы на 4,0 нг/см², что указывает на замещение хлор-ионов $(-\text{Cl})_x$ на гидроксильные $(-\text{OH})_x$ группы. Общий прирост за цикл (Δm_A) в среднем составляет 31 нг/см², что на 7 нг/см² меньше наблюдаемого при схожих условиях прироста массы за цикл в процессе роста АСО Al_2O_3 (~38,0 нг/см²) с использованием ТМА и H_2O [7]. Быстрое протекание реакции обмена ТМА при последующих его напусках с поверхностными гидроксильными группами объясняется меньшими пространственными препятствиями между соседними адсорбированными в предыдущих циклах АСО на реакционную поверхность молекул прекурсоров [20], что подтверждается экспериментальными данными КПМ, прирост за цикл в случае ТМА больше, что говорит о большем числе присоединенных молекул данного прекурсора, чем в случае хлорида алюминия.

Постоянную роста (growth per cycle – GPC) в Å за цикл можно рассчитать по уравнению $\text{GPC} =$

$= \Delta m_A / \rho$ [13], где ρ – плотность АСО оксида алюминия, равная $\sim 3,0 \text{ г/см}^3$ [7]. Постоянная роста (GPC) при температуре 150°C составила $\sim 1,03 \text{ \AA/цикл}$, что согласуются с данными ($\sim 1 \text{ \AA/цикл}$), полученными при этой же температуре в работе [20]. Также это значение на $0,27 \text{ \AA}$ меньше значения, полученного в процессе роста АСО Al_2O_3 с использованием ТМА и H_2O в работе [7] при той же температуре (GPC = $1,3 \text{ \AA/цикл}$).

Толщину одного монослоя Al_2O_3 можно рассчитать из уравнения $h = (M/(N_A \times \rho))^{1/3}$, где M – молярная масса $\text{AlO}_{3/2}$ ($50,98 \text{ г/моль}$), N_A – число Авогадро ($6,022 \cdot 10^{23} \text{ ат/моль}$) [13]. Рассчитанная толщина монослоя составляет $3,04 \text{ \AA}$, что указывает на субмонослойный режим роста пленки.

Рассчитанная эффективная посадочная площадка хлорида алюминия по формуле Брунауэра-Эмметта-Теллера $\sigma = 1,09(M/(\rho \cdot N_A))^{2/3}$, где M – молярная масса AlCl_3 ($133,34 \text{ г/моль}$), ρ – плотность AlCl_3 ($2,48 \text{ г/см}^3$ [28]), составила $0,220 \text{ нм}^2$, а

для ТМА – $0,320 \text{ нм}^2$ (плотность ТМА – $0,752 \text{ г/см}^3$ [28], молярная масса ТМА $72,09 \text{ г/моль}$). Используя расчетную эффективную посадочную площадку AlCl_3 , определили теоретический прирост массы для одного монослоя Al_2O_3 из уравнения $\Delta m(\text{AlO}_{3/2}) = M/(\sigma \cdot N_A)$, равный $38,48 \text{ нг/см}^2$, что на $7,48 \text{ нг/см}^2$ выше экспериментального значения. Различие между экспериментальным и теоретическим значением прироста массы можно объяснить допущениями в применении формулы Брунауэра-Эмметта-Теллера.

Хлорид алюминия может взаимодействовать с одной поверхностной гидроксильной группой, с двумя, с тремя, но при участии трех гидроксильных групп дальнейший рост пленки не будет наблюдаться. В таблице рассмотрены случаи, когда рост AlO_x осуществляется с участием одной, двух или при их сочетании поверхностных гидроксильных групп. Звездочкой отмечены поверхностные группы, а квадратной скобкой – поверхность.

Таблица

Возможные механизмы роста AlO_x с расчетными значениями $R = \Delta m_A / \Delta m_B$
 Table. Possible mechanisms of AlO_x ALD growth with calculated values $R = \Delta m_A / \Delta m_B$

x	Реакции	R
1	$]-\text{OH}^* + \text{AlCl}_{3(r)} \rightarrow]-\text{O}-\text{AlCl}_2^* + \text{HCl}_{(r)}$ $]-\text{O}-\text{AlCl}_2^* + 2\text{H}_2\text{O}_{(r)} \rightarrow]-\text{O}-\text{Al}-(\text{OH})_2^* + 2\text{HCl}_{(r)}$	0,62
1,5	$]-(\text{OH})_{1,5}^* + \text{AlCl}_{3(r)} \rightarrow]-(\text{O})_{1,5}-\text{Al}-(\text{Cl})_{1,5}^* + 1,5\text{HCl}_{(r)}$ $]-(\text{O})_{1,5}-\text{Al}-(\text{Cl})_{1,5}^* + 1,5\text{H}_2\text{O}_{(r)} \rightarrow]-(\text{O})_{1,5}-\text{Al}-(\text{OH})_{1,5}^* + 1,5\text{HCl}_{(r)}$	0,65
2	$]-(\text{OH})_2^* + \text{AlCl}_{3(r)} \rightarrow]-(\text{O})_2-\text{AlCl}^* + 2\text{HCl}_{(r)}$ $]-(\text{O})_2-\text{AlCl}^* + \text{H}_2\text{O}_{(r)} \rightarrow]-(\text{O})_2-\text{AlOH}^* + \text{HCl}_{(r)}$	0,70

Используя данные КПМ и уравнение $\frac{\Delta m_A}{\Delta m_B} = \frac{M(\text{AlO}_{3/2})}{M(\text{AlCl}_3) - xM(\text{HCl})}$, [30] рассчитали число прореагировавших поверхностных гидроксильных групп (x). Для данного случая $x = 2$, что указывает на высокую вероятность взаимодействия хлорида алюминия с двумя гидроксильными группами и его бидентантное присоединение по вицинальным гидроксильным группам согласно схеме на рис. 5:

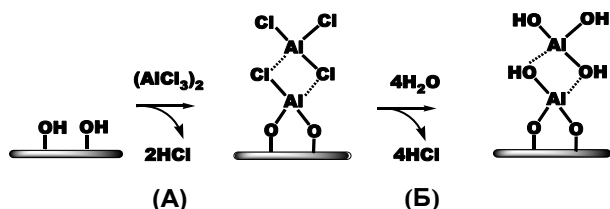


Рис. 5. Схематическое представление роста пленки Al_2O_3 с использованием AlCl_3 и H_2O

Fig. 5. Schematic representation of Al_2O_3 film growth using AlCl_3 and H_2O

Данное значение отличается от результатов, приведенных в работе [20], где в поверхностных реакциях обмена лигандов при температуре 200°C , согласно квантово-химическим расчетам, предпочтительно участвует один хлор-лиганд в AlCl_3 . Это отличие можно объяснить разницей в температуре выполнения экспериментов.

Приведенная выше схема роста была предложена Ю. К. Ежовским [9] как одно из направлений протекания реакций роста пленки оксида алюминия, и она согласуется с нашими экспериментальными данными.

б) *Ex situ* анализ полученных пленок с использованием СЭ и РФЭС

Ex situ анализ полученных на кремниевых подложках Si <100> с затравочным АСО слоем Al_2O_3 ($\sim 30\text{-}50 \text{ \AA}$) пленок провели методами СЭ и РФЭС.

По данным эллипсометрии толщина АСО Al_2O_3 пленки составила $8,36 \text{ нм}$ с учетом погрешности, которая рассчитана для трех образцов, полу-

ченных одновременно путем проведения 80 циклов АСО. Из данных КПМ рассчитанная толщина полученной пленки с учетом постоянной роста за цикл ($GPC = 1,03 \text{ \AA/цикл}$) составила 8,24 нм. Как видно, эти данные хорошо согласуются друг с другом.

Элементный состав определяли из обзорных РФЭС спектров. Анализ пленки толщиной $\sim 84 \text{ \AA}$ показал следующий состав: Al 2p (30,43 ат.%), O 1s (46,87 ат.%), C 1s (19,87 ат.%) и Cl 2p (2,82 ат.%). Содержание атомов хлора в пленках говорит о неполном протекании реакции гидролиза или о реадсорбции хлорсодержащих продуктов реакции. При проведении АСО Al_2O_3 с использованием хлорида алюминия требуется высокая температура подложки, примерно выше 500°C для предотвращения включения атомов Cl в пленку [31], но для применения в плоских дисплеях процесс осаждения должен проводиться при относительно низкой температуре (ниже 500°C) [32]. Для сравнения в пленках оксида алюминия, полученных при температурах 300°C и 330°C , также был обнаружен хлор в количестве 1,8 ат.% [33] и 1,2 ат.% [27] соответственно. В [20] при получении пленки Al_2O_3 при 200°C содержание хлора составляло меньше 1%, а в [9] при температурах $130\text{--}250^\circ\text{C}$ не обнаружены пики для атомов хлора. Присутствие примесей углерода обусловлено загрязнением поверхности образцов при контакте с воздухом в промежутке между АСО и РФЭС анализом.

Из значений концентраций атомов кислорода и алюминия соотношение O/Al равно 1,54, что согласуется со значением 1,5 для стехиометрического Al_2O_3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование процесса АСО оксида алюминия с использованием хлорида алюминия и воды методом кварцевого пьезоэлектрического микро-взвешивания при температуре 150°C *in situ* показало линейный воспроизводимый рост пленок с количеством циклов. Поверхностные реакции AlCl_3 и H_2O имели самоограничивающийся характер. Расчеты показали, что рост пленки оксида алюминия происходит в субмонослойном режиме. Из полученных КПМ данных видно, что при напуске хлорида алюминия происходит увеличение массы, а напуск воды приводит к ее снижению, что согласуется с предложенной схемой осаждения, где рост пленки происходит благодаря реакциям замещения хлор-лигандов AlCl_3 на гидроксильные группы H_2O . В процессе реакции AlCl_3 с гидроксильной поверхностью в основном наблюдается бидентатное присоединение. Результаты РФЭС показывают небольшое содержание примесей в виде хлора, а соотношение кислорода и алюминия совпадает со значением для стехиометрического Al_2O_3 .

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Финансирование работы: Работа выполнена в рамках Государственного Задания FZNZ-2025-0003.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Funding for the work: The work was carried out within the framework of State Assignment FZNZ-2025-0003.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алесковский В.Б., Кольцов С.И. Некоторые закономерности реакций молекулярного наплаивания. Науч.-технич. конф. Ленингр. технол. ин-та им. Ленсовета. Л.: ЛТИ им. Ленсовета. 1965. С. 67.
2. Malygin A.A., Drozd V.E., Malkov A.A., Smirnov V.M. From V.B.Aleskovskii's "Framework" Hypothesis to the Method of Molecular Layering/Atomic Layer Deposition. *CVD*. 2015. V. 21. N 10-12. P. 216-240. DOI: 10.1002/cvde.201502013.
3. Popov G., Mattinen M., Vihervaara A., Leskelä M. Recent trends in thermal atomic layer deposition chemistry. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2025. V. 43. N. 3. P. 030801-1- 030801-45. DOI: 10.1116/6.0004320.
4. Малыгин А.А. Метод молекулярного наплаивания: от фундаментальных исследований к коммерциализации. *Росс. хим. журн.* 2013. Т. LVIL. № 6. С. 7-20.
5. Кольцов С.И., Малыгин А.А., Малков А.А., Соснов Е.А. Фундаментальные и прикладные основы нанотехнологии

REFERENCES

1. Aleskovsky V.B., Kol'tsov S.I. Some patterns of molecular layering reactions. abstracts of the Scientific and Technical Conference of the Leningrad Technol. Inst. named after Lensovet. 1965. P. 67 (in Russian).
2. Malygin A.A., Drozd V.E., Malkov A.A., Smirnov V.M. From V.B.Aleskovskii's "Framework" Hypothesis to the Method of Molecular Layering/Atomic Layer Deposition. *CVD*. 2015. V. 21. N 10-12. P. 216-240. DOI: 10.1002/cvde.201502013.
3. Popov G., Mattinen M., Vihervaara A., Leskelä M. Recent trends in thermal atomic layer deposition chemistry. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2025. V. 43. N. 3. P. 030801-1- 030801-45. DOI: 10.1116/6.0004320.
4. Malygin A.A. The molecular layering method: from basic research to commercialization. *Russ. Khim. Zhurn.* 2013. V. LVIL. N 6. P. 7-20 (in Russian).
5. Kol'tsov S. I., Malygin A.A., Malkov A.A., Sosnov E.A. Fundamental and applied fundamentals of nanotechnology of molecular layering. SPb.: SPbGTI(TU). 2021. 279 p. (in Russian).

- молекулярного наслаивания. СПб.: СПбГТИ(ТУ). 2021. 279 с.
6. Schmidt J., Merkle A., Brendel R., Hoex B., van de Sanden M.C.M., Kessels W.M.M. Surface Passivation of High-efficiency Silicon Solar Cells by Atomic-layer-deposited Al₂O₃. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2008. 16. P. 461–466. DOI: 10.1002/pip.823.
7. Groner M.D., Fabreguette F.H., Elam J.W., George S.M. Low-Temperature Al₂O₃ Atomic Layer Deposition. *Chem. Mater.* 2004. V. 16. P. 639–645. DOI: 10.1021/cm0304546.
8. Potts S.E., Schmalz L., Fenker M., Díaz B., Świątowska J., Maurice V., Seyeux A., Marcus P., Radnóczy G., Tóth L., Kessels W.M.M. Ultra-Thin Aluminium Oxide Films Deposited by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition for Corrosion Protection. *J. Electrochem. Soc.* 2011. V. 158. P. 132–138. DOI: 10.1149/1.3560197.
9. Ежовский Ю.К. Молекулярное наслаивание оксидов кремния и алюминия на бинарных полупроводниках. *ЖФХ*. 2017. Т. 91. № 4. С. 691–695. DOI: 10.7868/S0044453717040082.
10. Новиков Ю.Н., Гриценко В.А., Насыров К.А. Многофоновый механизм ионизации ловушек в Al₂O₃: эксперимент и численное моделирование. *Письма в ЖЭТФ*. 2009. Т. 89. Вып. 10. С. 599–602. DOI: 10.1134/S0021364009100075.
11. Ahmed Farag I.S., Battisha I.K., El-Rafaay M.M. Study of dielectric properties of α -alumina doped with MnO, CdO and MoO. *Indian J. Pure Appl. Phys.* 2005. N 43. P. 446–458.
12. Hahtela O., Sievilä P., Chekurov N., Titttonen I. Atomic layer deposited alumina (Al₂O₃) thin films on a high-Q mechanical silicon oscillator. *J. Micromech. Microeng.* 2007. V. 17. P. 737–742. DOI: 10.1088/0960-1317/17/4/010.
13. Максумова А.М., Абдулагатов И.М., Палчаев Д.К., Рабаданов М.Х., Абдулагатов А.И. Исследование процесса атомно-слоевого осаждения оксида молибдена и титан-молибденовых оксидных пленок методом кварцевого пьезоэлектрического микровзвешивания. *ЖФХ*. 2022. Т. 96. № 10. С. 1490–1498. DOI: 10.31857/S0044453722100181.
14. Гаджимурадов С.Г., Сулейманов С.И., Максумова А.М., Дроздов Ю.О., Абдулагатов И.М., Абдулагатов А.И. Термодинамическое моделирование процессов молекулярного наслаивания MoO₃ на β -кристобалите и монослоях MoO_x и AlO_x методом DFT: сравнительная оценка реакций MoOCl₄ и MoO₂Cl₂ с H₂O. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 3. С. 50–63. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7132.
15. Elam J.W., Mane A.U., Libera J.A., Hryn J.N., Siegmund O.H.W., McPhate J., Wetstein M.J., Elagin A., Minot M.J., O'Mahony A., Wagner R.G., Tong W.M., Brodie A.D., McCord M.A., Bevis C.F. Synthesis, Characterization, and Application of Tunable Resistance Coatings Prepared by Atomic Layer Deposition. *ECS Trans.* 2013. V. 58. N 10. P. 249–261. DOI: 10.1149/05810.0249ecst.
16. Акимов Ал.С., Петренко Т.В., Герасимов Е.Ю., Акимов А.Ю. Физико-химические и каталитические свойства NiMo-содержащих алюмооксидных каталитических систем. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 8. С. 32–40. DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.1t.
17. Mäikkulainen V., Leskelä M., Ritala M., Puurunen R.L. Crystallinity of inorganic films grown by atomic layer deposition: Overview and general trends. *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 021301. DOI: 10.1063/1.4757907.
18. Roy A.K., Baumann W., Koenig I., Baumann G., Schulze S., Hietschold M., Maeder T., Nestler D.J., Wielage B., Goedel W.A. Atomic layer deposition (ALD) as a coating tool for reinforcing fibers. *Anal. Bioanal. Chem.* 2010. V. 396. P. 1913–1919. DOI: 10.1007/s00216-010-3470-9.
19. Schmidt J., Merkle A., Brendel R., Hoex B., van de Sanden M.C.M., Kessels W.M.M. Surface Passivation of High-efficiency Silicon Solar Cells by Atomic-layer-deposited Al₂O₃. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2008. 16. P. 461–466. DOI: 10.1002/pip.823.
7. Groner M.D., Fabreguette F.H., Elam J.W., George S.M. Low-Temperature Al₂O₃ Atomic Layer Deposition. *Chem. Mater.* 2004. V. 16. P. 639–645. DOI: 10.1021/cm0304546.
8. Potts S.E., Schmalz L., Fenker M., Díaz B., Świątowska J., Maurice V., Seyeux A., Marcus P., Radnóczy G., Tóth L., Kessels W.M.M. Ultra-Thin Aluminium Oxide Films Deposited by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition for Corrosion Protection. *J. Electrochem. Soc.* 2011. V. 158. P. 132–138. DOI: 10.1149/1.3560197.
9. Ezhovskii Yu.K. Molecular layering of silicon and aluminum oxides on binary semiconductors. *Zhurn. Fizich. Khim.* 2017. V. 91. N 4. P. 691–695 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044453717040082.
10. Novikov Yu.N., Gritsenko V.A., Nasyrov K.A. Multiphonon mechanism of trap ionization in Al₂O₃: experiment and numerical modeling. *Pis'ma. ZHETF*. 2009. V. 89. I. 10. P. 599–602 (in Russian). DOI: 10.1134/S0021364009100075.
11. Ahmed Farag I.S., Battisha I.K., El-Rafaay M.M. Study of dielectric properties of α -alumina doped with MnO, CdO and MoO. *Indian J. Pure Appl. Phys.* 2005. N 43. P. 446–458.
12. Hahtela O., Sievilä P., Chekurov N., Titttonen I. Atomic layer deposited alumina (Al₂O₃) thin films on a high-Q mechanical silicon oscillator. *J. Micromech. Microeng.* 2007. V. 17. P. 737–742. DOI: 10.1088/0960-1317/17/4/010.
13. Maksumova A.M., Abdulagatov I.M., Palchaev D.K., Rabadanov M.Kh., Abdulagatov A.I. Studying the atomic layer deposition of molybdenum oxide and titanium–molybdenum oxide films using quartz crystal microbalance. *Rus. J. Phys. Chem.* 2022. V. 96. N 10. P. 2206–2214. DOI: 10.1134/s0036024422100181.
14. Gadjimuradov S.G., Suleymanov S.I., Maksumova A.M., Drozdov Ye.O., Abdulagatov I.M., Abdulagatov A.I. Thermodynamic modeling of the processes of molecular layering of MoO₃ on β -cristobalite and monolayers of MoO_x and AlO_x by the DFT method: comparative evaluation of the reactions of MoOCl₄ and MoO₂Cl₂ with H₂O. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 3. P. 50–63 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7132.
15. Elam J.W., Mane A.U., Libera J.A., Hryn J.N., Siegmund O.H.W., McPhate J., Wetstein M.J., Elagin A., Minot M.J., O'Mahony A., Wagner R.G., Tong W.M., Brodie A.D., McCord M.A., Bevis C.F. Synthesis, Characterization, and Application of Tunable Resistance Coatings Prepared by Atomic Layer Deposition. *ECS Trans.* 2013. V. 58. N 10. P. 249–261. DOI: 10.1149/05810.0249ecst.
16. Akimov Al.S., Petrenko T.V., Gerasimov E.Yu., Akimov A.S. Physicochemical and catalytic properties of NiMo-containing alumina-oxide catalytic systems. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 8. P. 32–40 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.1t.
17. Mäikkulainen V., Leskelä M., Ritala M., Puurunen R.L. Crystallinity of inorganic films grown by atomic layer deposition: Overview and general trends. *J. Appl. Phys.* 2013. V. 113. P. 021301. DOI: 10.1063/1.4757907.
18. Roy A.K., Baumann W., Koenig I., Baumann G., Schulze S., Hietschold M., Maeder T., Nestler D.J., Wielage B., Goedel W.A. Atomic layer deposition (ALD) as a coating tool for reinforcing fibers. *Anal. Bioanal. Chem.* 2010. V. 396. P. 1913–1919. DOI: 10.1007/s00216-010-3470-9.
19. Helmboldt O., Hudson L.K., Misra Ch., Wefers K., Heck W., Stark H., Danner M., Rösch N. Aluminum Compounds,

19. **Helmboldt O., Hudson L.K., Misra Ch., Wefers K., Heck W., Stark H., Danner M., Rösch N.** Aluminum Compounds, Inorganic. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 2012. V. 2. P. 569-584. DOI: 10.1002/14356007.a01_527.pub2.
20. **Oh I.-K., Sandoval T.E., Liu T.-L., Richey N.E., Nguyen Ch.T., Gu B., Lee H.-B.-R., Tonner-Zech R., Bent S.F.** Elucidating the Reaction Mechanism of Atomic Layer Deposition of Al_2O_3 with a Series of $\text{Al}(\text{CH}_3)_x\text{Cl}_{3-x}$ and $\text{Al}(\text{C}_y\text{H}_{2y+1})_3$ Precursors. *J. Am. Chem. Soc.* 2022. V. 144. P. 11757–11766. DOI: 10.1021/jacs.2c03752.
21. **Кольцов С.И., Копылов В.Б., Смирнов В.М., Алесковский В.Б.** Синтез и исследование алюминийкислородных слоев на поверхности кремнезема. *ЖПХ*. 1976. Т. 49. № 3. С. 516–519.
22. **Färm E., Kemell M., Ritala M., Leskelä M.** Selective-Area Atomic Layer Deposition Using Poly(methyl methacrylate) Films as Mask Layers. *J. Phys. Chem.* 2008. V. 112. N 40. P. 15791-15795. DOI: 10.1021/jp803872s.
23. **Ежовский Ю.К., Клусевич А.И.** Формирование и диэлектрические свойства многослойных наноструктур на основе оксидов тантала и алюминия. *Неорг. матер.* 2003. Т. 39. № 10. С. 1230-1235.
24. **Kukli K., Ritala M., Leskelä M.** Development of Dielectric Properties of Niobium Oxide, Tantalum Oxide, and Aluminum Oxide Based Nanolayered Materials. *J. Electrochem. Soc.* 2001. V. 148. N2. F35-F41. DOI: 10.1149/1.1343106.
25. **Dueñas S., Castan H., Garcia H., de Castro A., Bailon L., Kukli K., Aidla A., Aarik J., Mändar H., Uustare T., Lu J., Härsta A.** Influence of single and double deposition temperatures on the interface quality of atomic layer deposited Al_2O_3 dielectric thin films on silicon. *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. P. 054902. DOI: 10.1063/1.2177383.
26. **Kemell M., Färm E., Ritala M., Leskelä M.** Surface modification of thermoplastics by atomic layer deposition of Al_2O_3 and TiO_2 thin films. *Eur. Polym. J.* 2008. V. 44. I. 11. P. 3564-3570. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2008.09.005.
27. **Yun S. J., Kang J. S., Paek M.Ch., Nam K.-S.** Large-Area Atomic Layer Deposition and Characterization of Al_2O_3 Film Grown Using AlCl_3 and H_2O . *J. Korean Phys. Soc.* 1998. V. 33. P. 170-174.
28. **Lide D.R.** Handbook of chemistry and physics. 90th Edition CD-ROM Version. 2010.
29. **Elam J.W., Groner M.D., George S.M.** Viscous flow reactor with quartz crystal microbalance for thin film growth by atomic layer deposition. *Rev. Sci. Instrum.* 2002. V. 73. N 8. P. 2981–2987. DOI: 10.1063/1.1490410.
30. **Максумова А.М., Бодалёв И.С., Сулейманов С.И., Алиханов Н.М.-Р., Абдулагатов И.М., Рабаданов М.Х., Абдулагатов А.И.** Атомно-слоевое осаждение алюминий-молибденовых оксидных пленок с использованием триметилалюминия, оксотетрахлорида молибдена и воды. *Неорг. мат.* 2023. Т. 59. № 4. С. 384–393. DOI: 10.31857/S0002337X2304005X.
31. **Suntola T.** Handbook of Crystal Growth 3, Thin Films and Epitaxy, Part B: Growth Mechanics and Dynamics. Amsterdam: Elsevier Science. 1994. 1065 p.
32. **Yun S.J., Lee K.-H., Skarp J., Kim H.-R., Nam K.-S.** Dependence of atomic layer-deposited Al_2O_3 films characteristics on growth temperature and Al precursors of $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ and AlCl_3 . *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1997. V. 15. P. 2993-2997. DOI: 10.1116/1.580895.
33. **Raisanen P.I., Ritala M., Leskela M.** Atomic layer deposition of Al_2O_3 films using AlCl_3 and $\text{Al}(\text{OiPr})_3$ as precursors. *J. Mater. Chem.* 2002. V. 12. P. 1415–1418. DOI: 10.1039/b201385c.
- Inorganic. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 2012. V. 2. P. 569-584. DOI: 10.1002/14356007.a01_527.pub2.
20. **Oh I.-K., Sandoval T.E., Liu T.-L., Richey N.E., Nguyen Ch.T., Gu B., Lee H.-B.-R., Tonner-Zech R., Bent S.F.** Elucidating the Reaction Mechanism of Atomic Layer Deposition of Al_2O_3 with a Series of $\text{Al}(\text{CH}_3)_x\text{Cl}_{3-x}$ and $\text{Al}(\text{C}_y\text{H}_{2y+1})_3$ Precursors. *J. Am. Chem. Soc.* 2022. V. 144. P. 11757–11766. DOI: 10.1021/jacs.2c03752.
21. **Kol'tsov S.I., Kopylov V.B., Smirnov V.M., Aleskovskii V.B.** Synthesis and investigation of aluminum-oxygen layers on the surface of silica. *J. Appl. Chem. USSR*. 1976. V. 49. N 3. P. 525–528.
22. **Färm E., Kemell M., Ritala M., Leskelä M.** Selective-Area Atomic Layer Deposition Using Poly(methyl methacrylate) Films as Mask Layers. *J. Phys. Chem.* 2008. V. 112. N 40. P. 15791-15795. DOI: 10.1021/jp803872s.
23. **Ezhovskii Y.K., Klusevich A.I.** Fabrication and Dielectric Properties of Multilayer $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ Nanostructures. *Inorg. Mater.* 2003. V. 39. P. 1062–1066. DOI: 10.1023/A:1026043209924.
24. **Kukli K., Ritala M., Leskelä M.** Development of Dielectric Properties of Niobium Oxide, Tantalum Oxide, and Aluminum Oxide Based Nanolayered Materials. *J. Electrochem. Soc.* 2001. V. 148. N2. F35-F41. DOI: 10.1149/1.1343106.
25. **Dueñas S., Castan H., Garcia H., de Castro A., Bailon L., Kukli K., Aidla A., Aarik J., Mändar H., Uustare T., Lu J., Härsta A.** Influence of single and double deposition temperatures on the interface quality of atomic layer deposited Al_2O_3 dielectric thin films on silicon. *J. Appl. Phys.* 2006. V. 99. P. 054902. DOI: 10.1063/1.2177383.
26. **Kemell M., Färm E., Ritala M., Leskelä M.** Surface modification of thermoplastics by atomic layer deposition of Al_2O_3 and TiO_2 thin films. *Eur. Polym. J.* 2008. V. 44. I. 11. P. 3564-3570. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2008.09.005.
27. **Yun S. J., Kang J. S., Paek M.Ch., Nam K.-S.** Large-Area Atomic Layer Deposition and Characterization of Al_2O_3 Film Grown Using AlCl_3 and H_2O . *J. Korean Phys. Soc.* 1998. V. 33. P. 170-174.
28. **Lide D.R.** Handbook of chemistry and physics. 90th Edition CD-ROM Version. 2010.
29. **Elam J.W., Groner M.D., George S.M.** Viscous flow reactor with quartz crystal microbalance for thin film growth by atomic layer deposition. *Rev. Sci. Instrum.* 2002. V. 73. N 8. P. 2981–2987. DOI: 10.1063/1.1490410.
30. **Maksumova A.M., Bodalev I.S., Suleimanov S.I., Alikhanov N.M.R., Abdulagatov I.M., Rabadanov M.Kh., Abdulagatov A.I.** Growth of aluminum molybdenum oxide films by atomic layer deposition with using trimethylaluminum, molybdenum oxytetrachloride, and water. *Inorg. Mater.* 2023. V. 59. N 4. P. 369-378. DOI: 10.1134/s0020168523040052.
31. **Suntola T.** Handbook of Crystal Growth 3, Thin Films and Epitaxy, Part B: Growth Mechanics and Dynamics. Amsterdam: Elsevier Science. 1994. 1065 p.
32. **Yun S.J., Lee K.-H., Skarp J., Kim H.-R., Nam K.-S.** Dependence of atomic layer-deposited Al_2O_3 films characteristics on growth temperature and Al precursors of $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ and AlCl_3 . *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1997. V. 15. P. 2993-2997. DOI: 10.1116/1.580895.
33. **Raisanen P.I., Ritala M., Leskela M.** Atomic layer deposition of Al_2O_3 films using AlCl_3 and $\text{Al}(\text{OiPr})_3$ as precursors. *J. Mater. Chem.* 2002. V. 12. P. 1415–1418. DOI: 10.1039/b201385c.

Поступила в редакцию (Received) 02.12.2025

Принята к опубликованию (Accepted) 30.03.2026