

ТЕХНОЛОГИЯ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУР

Герасимчук С.Н., Афанасьев А.А., Сухоцкий М.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Позняк А.А. – к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе представлен комплексный анализ технологии атомно-слоевого осаждения (ALD) с акцентом на осаждение оксида алюминия. На основании обобщения литературных данных рассмотрены принципы метода, оптимальные параметры процесса (температура $200 \pm 2^\circ\text{C}$, скорость роста $0,11 \pm 0,01$ нм/цикл), а также его уникальные возможности по созданию конформных покрытий на структурах с соотношением сторон $> 50:1$. Особое внимание уделено применению ALD в микроэлектронике, энергетике и катализе. Систематизированы перспективные направления развития технологии, включая создание многослойных структур и интеграцию с другими нанотехнологическими методами.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение, наноструктуры, микроэлектроника, тонкие пленки.

Введение. Технология атомно-слоевого осаждения (ALD) заняла особое место в современном материаловедении и нанотехнологиях благодаря своей уникальной способности создавать ультратонкие пленки с контролем толщины на атомарном уровне. В отличие от других методов осаждения, ALD основан на последовательных самоограничивающихся поверхностных реакциях, что обеспечивает беспрецедентную конформность покрытий даже на структурах с высокой топографической сложностью.

Данная работа представляет собой систематический обзор современных достижений в области ALD, основанный на анализе научной литературы и экспериментальных данных, представленных различными исследовательскими группами. Основное внимание уделено технологии осаждения оксида алюминия (Al_2O_3) – материала, находящего широкое применение в микроэлектронике, энергетике и катализе. Выбор именно этого материала обусловлен его исключительными диэлектрическими свойствами, химической стабильностью и совместимостью с современными полупроводниковыми технологиями.

Целью работы является обобщение и анализ существующих данных о параметрах процесса ALD, его технологических особенностях и практических приложениях. Особый акцент сделан на рассмотрении механизмов роста пленок, факторов, влияющих на качество покрытий, и перспективных направлений развития технологии.

Основная часть. Принцип атомно-слоевого осаждения основан на последовательном проведении химических реакций между газообразными прекурсорами на поверхности подложки. Этот метод обеспечивает точный контроль состава и толщины покрытия, что делает его широко применимым в различных областях науки и техники. В основе процесса лежит чередующаяся подача различных реагентов, которые взаимодействуют с поверхностью, образуя монослойные покрытия. Такой механизм осаждения гарантирует равномерность и повторяемость результатов, что особенно важно для микроэлектроники, нанотехнологий и других высокотехнологичных отраслей.

Типичный цикл ALD включает четыре стадии:

- подача первого прекурсора (например, триметилалюминия – ТМА), который хемосорбируется на поверхности подложки, заполняя активные центры;
- продувка реакционной камеры инертным газом для удаления несвязанных молекул;

- подача второго прекурсора (например, паров воды), который вступает в реакцию с адсорбированным слоем, завершая формирование монослоя оксида;

- заключительная продувка для очистки камеры от побочных продуктов реакции.

Каждая из этих стадий является самоограничивающейся, что обеспечивает точный контроль толщины осаждаемого слоя. Таким образом, *ALD* позволяет наносить покрытия с атомарной точностью, независимо от сложности геометрии подложки. Это свойство делает метод особенно ценным при работе с 3D-структурами, такими как нанопористые материалы или сложные микроэлектронные компоненты. Схему процесса можно представить следующим образом (рисунок 1).

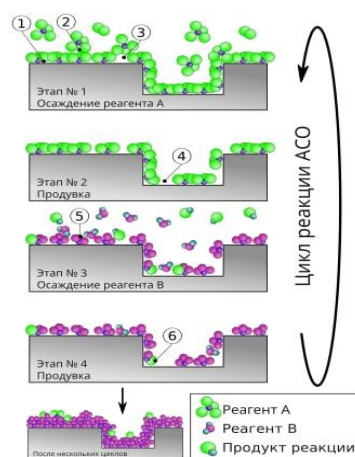


Рисунок 1 – Схема процесса *ALD*

В случае осаждения оксида алюминия наиболее распространенной является система прекурсоров ТМА– H_2O . Оптимальные параметры этого процесса включают: температурный диапазон 150–300 °С (с оптимумом около 200 °С), давление в реакционной камере 2–3 мбар, и типичную скорость роста $0,11 \pm 0,01$ нм за цикл. Важно отметить, что, как демонстрируют многочисленные исследования [1, 3], такая последовательность обеспечивает практически идеальную линейную зависимость толщины пленки от количества циклов ($R^2 = 0,998$), что свидетельствует о высочайшей воспроизводимости процесса.

Особого внимания заслуживает способность *ALD* создавать конформные покрытия на структурах с экстремально высоким соотношением сторон. Экспериментальные данные, полученные различными исследовательскими группами [4, 6], убедительно показывают, что метод позволяет равномерно покрывать поверхности с соотношением сторон более 50:1. Это свойство *ALD* особенно ценно для современных приложений в микроэлектронике, где постоянно уменьшаются размеры элементов и увеличивается плотность их размещения.

Применение *ALD*-покрытий из Al_2O_3 в микроэлектронике решает несколько критически важных задач. Во-первых, такие пленки служат эффективными барьерными слоями, предотвращающими утечки тока в миниатюрных транзисторах [1, 5]. Во-вторых, они обеспечивают защиту чувствительных компонентов от внешних воздействий. Исследования [4, 7] демонстрируют, что даже 10-нанометровый слой Al_2O_3 , полученный методом *ALD*, способен эффективно защищать кремниевую подложку от коррозии в агрессивных средах.

В энергетической отрасли *ALD* находит применение при создании защитных покрытий для электродов литий-ионных аккумуляторов, что позволяет существенно увеличить их срок службы [6]. В катализе *ALD*-методология используется для синтеза наноструктурированных каталитических систем с точно контролируемым составом [3]. Перспективным направлением является также применение *ALD* в биомедицине, в частности, для нанесения биосовместимых покрытий на медицинские имплантаты [7].

Перспективы развития технологии *ALD* связаны с несколькими ключевыми направлениями: расширением номенклатуры осаждаемых материалов, оптимизацией процессов для сложных 3D-структур, разработкой гибридных методов в сочетании с другими нанотехнологическими подходами. Особый интерес представляет создание многослойных структур с чередованием различных материалов, что открывает новые возможности в дизайне функциональных наноматериалов.

Закключение. Проведенный в данной работе комплексный анализ технологии *ALD* позволяет констатировать, что этот метод занял прочные позиции в современном материаловедении и нанотехнологиях. На основании обобщения многочисленных литературных источников и экспериментальных данных различных исследовательских групп можно утверждать, что *ALD* обладает уникальными возможностями по созданию ультратонких пленок с беспрецедентной точностью контроля толщины на атомарном уровне. Особое значение имеет способность метода обеспечивать конформное покрытие структур с экстремально высоким соотношением сторон ($>50:1$), что делает его незаменимым для современных микро- и нанoeлектронных устройств.

Таким образом, технология *ALD* продолжает оставаться одним из наиболее перспективных и востребованных методов современной нанотехнологии. Ее дальнейшее развитие будет способствовать решению актуальных задач в области создания новых материалов и устройств с уникальными свойствами, что имеет важное значение для научно-технического прогресса в целом.

Список литературы

1. Miikkulainen, V. Crystallinity of inorganic films grown by atomic layer deposition: Overview and general trends / V. Miikkulainen, M. Leskelä, M. Ritala, R. L. Puurunen // *Journal of Applied Physics*. – 2013. – Vol. 114, No. 8. – P. 021301-1–021301-101. <https://dx.doi.org/10.1063/1.4757907>.
2. Мишкин В. П. Использование технологии *ALD* для нанесения Al_2O_3 на поверхность электрохимически активированного алюминия [Электронный ресурс] / В. П. Мишкин, Е. О. Соловьева, О. В. Тарасова, О. Ю. Черняева // *Огарёв-Online*. – 2017. – №16 (105). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-tehnologii-ald-dlya-naneseniya-al2o3-na-poverhnost-elektrohimicheskii-aktivirovanogo-alyuminiya>. Дата доступа: 24.03.2025.
3. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2007. 416 с.
4. Groner, M. D. Gas Diffusion Barriers on Polymers Using Al_2O_3 Atomic Layer Deposition / M. D. Groner, S. M. George, R. S. McLean, P. F. Garcia // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 88, Iss. 5. – P. 051907.
5. Атомно-слоевое осаждение [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Атомно-слоевое_осаждение. Дата доступа: 24.03.2025.
6. Что вам нужно знать об осаждении атомных слоев (*ALD*). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.powerwaywafer.com/ru/atomic-layer-deposition-ald.html>. Дата доступа: 24.03.2025.
7. Атомно-слоевое осаждение (*ALD*) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://qtsolar.com/services/atomno-sloevoe-osazhdenie-ald/>. Дата доступа: 24.03.2025.

UDC 539.23

ATOMIC LAYER DEPOSITION TECHNOLOGY FOR NANOSTRUCTURE FABRICATION

Gerasimchuk S.N., Afanasyev A.A., Sukhotsky M.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Poznyak A.A. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of EET

Annotation. The paper presents a comprehensive analysis of atomic layer deposition (*ALD*) technology with an emphasis on aluminum oxide deposition. Based on a summary of literature data, the principles of the method, optimal process parameters (temperature $200\pm2^\circ\text{C}$, growth rate 0.11 ± 0.01 nm/cycle), and its unique capabilities for creating conformal coatings on structures with an aspect ratio of $>50:1$ are considered. Particular attention is paid to the use of *ALD* in microelectronics, power engineering, and catalysis. Promising areas of technology development are systematized, including the creation of multilayer structures and integration with other nanotechnological methods.

Keywords: atomic layer deposition, nanostructures, microelectronics, thin films.