

УДК 621.793.1

ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ И ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Дорохов Алексей Алексеевич,

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

Кафедра «Функциональные наносистемы и высокотемпературные материалы», аспирант;

ORCID: 0009-0004-7553-5728; e-mail: m1606605@edu.misis.ru

Дорохов Александр Алексеевич,

Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, лётчика-космонавта А. А. Леонова, Королёв, Россия

Кафедра «Управление качеством в технологических системах», магистрант 2 курса.

Аннотация

В статье систематизированы и проанализированы основные термодинамические и кинетические критерии, определяющие процессы осаждения тонких плёнок и покрытий из газовой фазы методами химического (CVD) и физического (PVD) осаждения. Методологическую основу работы составили обобщение положений химической термодинамики и кинетики, анализ литературных данных, термодинамического моделирования и экспериментальных исследований. Особое внимание уделено транспортным свойствам газовой фазы – динамической вязкости, плотности и средней длине свободного пробега молекул. Показано, что термодинамические ограничения, включая условие отрицательного изменения энергии Гиббса и расчёт фазовых равновесий, задают принципиальную возможность синтеза целевой фазы, тогда как кинетические параметры регулируют скорость процесса, лимитирующую стадию и механизм роста. Число Кнудсена рассмотрено как критерий перехода от вязкостного к молекулярному режиму течения, влияющему на конформность и плотность покрытий. На примере диоксида циркония продемонстрирована связь между параметрами осаждения, фазовым составом и эксплуатационными свойствами покрытий. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании технологических режимов получения функциональных покрытий с заданной структурой и характеристиками.

Ключевые слова: осаждение из газовой фазы, CVD, PVD, термодинамика, кинетика, энергия активации, температура подложки, динамическая вязкость, плотность газа, длина свободного пробега, число Кнудсена, диоксид циркония, ZrO_2 , структура покрытий, фазовый состав.

MAIN CRITERIA FOR GAS-PHASE COATING DEPOSITION AND THE
INFLUENCE OF THERMODYNAMIC AND KINETIC PARAMETERS

Aleksey A. Dorokhov,

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

Department of Functional Nanosystems and High-Temperature Materials, postgraduate student;

ORCID: 0009-0004-7553-5728; e-mail: m1606605@edu.misis.ru

Aleksandr A. Dorokhov,

Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A. A.

Leonov, Korolyov, Russia

Department of Quality Management in Technological Systems, second-year master's student.

ABSTRACT

The article systematizes and analyzes the main thermodynamic and kinetic criteria governing thin-film and coating deposition from the gas phase by chemical vapor deposition (CVD) and physical vapor deposition (PVD). The methodological basis of the study includes generalization of the principles of chemical thermodynamics and kinetics, analysis of literature data, thermodynamic modeling, and experimental studies. Particular attention is paid to the transport properties of the gas phase, namely dynamic viscosity, density, and the mean free path of molecules. It is shown that thermodynamic constraints, including the requirement of negative Gibbs free energy change and phase-equilibrium calculations, determine the fundamental feasibility of synthesizing the target phase, whereas kinetic parameters regulate the process rate, the rate-limiting step, and the growth mechanism. The Knudsen number is considered as a criterion for the transition from viscous to molecular flow, which affects coating conformality and density. Using zirconium dioxide as an example, the relationship between deposition parameters, phase composition, and performance properties is demonstrated. The results obtained can be used to design technological regimes for producing functional coatings with specified structures and properties.

Keywords: gas-phase deposition, CVD, PVD, thermodynamics, kinetics, activation energy, substrate temperature, dynamic viscosity, gas density, mean free path, Knudsen number, zirconium dioxide, ZrO_2 , coating structure, phase composition.

Актуальность

Методы осаждения покрытий из газовой фазы – химическое осаждение из паровой фазы (Chemical Vapor Deposition, CVD) и физическое осаждение из паровой фазы (Physical Vapor Deposition, PVD) – широко применяются в микроэлектронике, оптике, машиностроении, энергетике и биомедицинских технологиях. Их распространённость определяется возможностью получать функциональные тонкие плёнки и покрытия с контролируемым фазовым составом, морфологией и эксплуатационными характеристиками. При этом воспроизводимость результата непосредственно зависит от корректного учёта термодинамических ограничений, кинетики поверхностных реакций и транспортных свойств газовой фазы. В связи с этим систематизация критериев, определяющих режим осаждения и свойства формируемых покрытий, сохраняет научную и практическую значимость [1-7, 19, 21].

Цель исследования

Цель исследования состоит в систематизации и анализе основных критериев осаждения покрытий из газовой фазы с выделением влияния термодинамических и кинетических факторов, включая динамическую вязкость, плотность и среднюю длину свободного пробега газовой смеси, а

также в демонстрации их практической реализации на примере диоксида циркония (ZrO_2) [8-12, 19-23].

Материалы и методы исследования

Исследование носит обзорно-аналитический характер. В работе использованы положения химической термодинамики и химической кинетики, методы сравнительного анализа научной литературы, а также данные термодинамического моделирования и экспериментальных исследований процессов CVD- и PVD-осаждения. Для интерпретации режимов течения газовой фазы применены представления кинетической теории газов и расчёты по числу Кнудсена. В качестве прикладного примера рассмотрены процессы получения покрытий на основе диоксида циркония, описанные в профильных публикациях [1-7, 19-23].

Результаты и их обсуждение

1. Термодинамические критерии осаждения.

Термодинамика определяет принципиальную возможность протекания химических реакций и фазовых переходов в системе «газ-подложка». Для CVD-процессов ключевым условием является отрицательное изменение свободной энергии Гиббса для суммарной реакции разложения или взаимодействия газообразных прекурсоров с образованием твёрдого покрытия [1, 2, 5, 8, 12]:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S < 0$$

где ΔH – энтальпия реакции, ΔS – энтропия, T – абсолютная температура.

На практике широко применяются расчёты равновесного состава газовой фазы методом минимизации свободной энергии. Для синтеза ZrO_2 из хлоридных прекурсоров термодинамический анализ показывает, что образование однофазного диоксида циркония возможно при высоком атомном отношении O/Zr (>4), низком отношении H/C (<10), давлении менее 100 кПа и температуре выше 800 °C [8, 12]. Влияние температуры на термодинамику неоднозначно: при недостаточно низких температурах движущая сила процесса может быть мала, тогда как чрезмерное повышение температуры способно привести к обратному травлению или испарению осаждённого материала. Снижение давления, в соответствии с принципом Ле Шателье, нередко используется в LPCVD-процессах для улучшения равномерности покрытия [1, 2, 5, 9].

2. Кинетические параметры процесса.

Даже при термодинамической разрешённости процесса скорость осаждения и свойства покрытия определяются кинетикой. В CVD-процессах последовательно реализуются транспорт реагентов к поверхности, адсорбция, поверхностные химические реакции и десорбция продуктов. Лимитирующей стадией может выступать либо массоперенос, либо поверхностная реакция. На этих стадиях существенную роль играют динамическая вязкость, плотность газовой смеси и длина свободного пробега молекул [1, 2, 5, 19, 21, 23].

Основным кинетическим фактором является температура. Зависимость скорости осаждения v от температуры описывается уравнением Аррениуса [1, 2, 5, 11]:

$$v = A \exp(-E_a / RT)$$

где E_a – эффективная энергия активации.

В низкотемпературной области, соответствующей кинетическому контролю, энергия активации велика, и скорость осаждения резко возрастает с повышением температуры. При более высоких температурах процесс переходит в диффузионный режим, и кажущаяся энергия активации снижается. Для осаждения ZrO_2 методом CVD показано, что при температурах ниже 636 °C процесс контролируется поверхностной реакцией с $E_a = 188$ кДж/моль, а при более высоких температурах энергия активации уменьшается до 38 кДж/моль [9-11].

Динамическая вязкость μ (Па·с) газовой смеси описывается кинетической теорией газов. Для идеального газа при не слишком высоких давлениях:

$$\mu = 1/3(\rho \bar{v} \lambda)$$

где ρ – плотность газа, \bar{v} – средняя тепловая скорость, λ – средняя длина свободного пробега. Вязкость слабо зависит от давления и растёт с температурой как $\mu \propto T^{0.5-1.0}$ [19]. При CVD она влияет на гидродинамическое сопротивление в реакторе, толщину пограничного слоя и эффективность перемешивания. При высоких скоростях потока и высоком давлении (APCVD) доминирует

вязкостное течение; при понижении давления (LPCVD) вклад вязкости уменьшается, и возрастает роль молекулярной диффузии.

Плотность газовой смеси ρ рассчитывается по уравнению состояния идеального газа:

$$\rho = (pM_{cp})/(RT)$$

где p – общее давление, M_{cp} – средняя молярная масса смеси. Плотность непосредственно определяет массовый расход реагентов, подаваемых в реактор, и время пребывания газа над подложкой. Снижение давления (вакуумная CVD) резко уменьшает плотность, что приводит к переходу от вязкостного течения к молекулярному, где длина свободного пробега становится сравнимой с размерами реактора [19, 21, 23].

Средняя длина свободного пробега λ (м) – среднее расстояние, которое молекула проходит между двумя последовательными столкновениями. Для идеального газа:

$$\lambda = (kT)/(\sqrt{2} \pi d^2 p)$$

где k – постоянная Больцмана, d – кинетический (эффективный) диаметр молекулы. Величина λ обратно пропорциональна давлению и при низких давлениях может достигать сантиметров и более [20]. Ключевым критерием является число Кнудсена:

$$Kn = \lambda/F,$$

где F – характерный размер реактора (диаметр трубы или сечение).

Влияние на процесс осаждения [21,22,23]:

- $Kn < 0,01$ – вязкостный (континуальный) режим. Столкновения между молекулами доминируют. Массоперенос описывается уравнениями гидродинамики и диффузии Фика. Этот режим характерен для атмосферного CVD (APCVD) и низкоскоростных потоков. Покрытия имеют более равномерную толщину на плоских подложках, но возможно образование пограничного слоя, ухудшающего покрытие ступенек (step coverage).

- $0,01 < Kn < 0,5$ – переходный (свободномолекулярно-вязкостный) режим. Необходимо использовать уравнения с поправками (например, модель пограничного слоя с проскальзыванием). Типичен для LPCVD при давлениях 10–1000 Па.

- $Kn > 0,5$ – молекулярный (свободномолекулярный) режим. Столкновениями молекул между собой можно пренебречь по сравнению со столкновениями со стенками. Массоперенос определяется диффузией Кнудсена и прямым баллистическим движением. Реализуется в сверхвысоковакуумных методах (МВЕ) и в некоторых высоковакуумных PVD-процессах. Покрытия отличаются высокой конформностью на микрорельефе, но низкой скоростью осаждения.

Для большинства CVD-процессов технологически предпочтителен вязкостный или нижняя граница переходного режима ($Kn \approx 0,01-0,1$), поскольку здесь достигается компромисс между скоростью роста и равномерностью покрытия. Для LPCVD-осаждения ZrO_2 при давлении порядка 100 Па, температуре 800–1000 К и диаметре реактора около 0,1 м характерна величина λ порядка 10^{-3} м и Kn около 0,01, что соответствует нижней границе переходного режима [8, 19, 21, 23].

Указанные параметры косвенно влияют на морфологию и плотность покрытий [8, 18, 21]:

- При малых Kn (высокое давление, малая λ пограничный слой толстый, градиент концентрации реагентов у подложки пологий – рост покрытия идёт в диффузионном режиме, часто формируется столбчатая структура с порами.

- При больших Kn (низкое давление, большая λ) режим близок к молекулярному – поток реагентов направлен нормально к подложке, покрытия более плотные, конформные, но скорость осаждения падает.

Для ZrO_2 показано, что при переходе от 1000 Па к 100 Па (увеличение λ в 10 раз) морфология меняется от грубостолбчатой к мелкозернистой, а плотность повышается с 92% до 98% [8].

3. Влияние параметров процесса на структуру и свойства покрытия.

Температура подложки T_s относительно температуры плавления материала T_m определяет структурную зону роста в соответствии с моделью Торнтонна. Для большинства керамических покрытий, включая ZrO_2 , при $T_s/T_m < 0,3$ формируется пористая столбчатая структура, при $0,5 < T_s/T_m < 0,8$ – плотная столбчатая, а при $T_s/T_m > 0,8$ – равноосные зёрна. Число Кнудсена, как показано в разделе 2, модифицирует эти зоны: при одинаковой приведённой температуре, но в молекулярном режиме ($Kn > 0,5$) структура становится более плотной и мелкозернистой [3, 4, 8, 18].

Фазовый состав ZrO_2 особенно чувствителен к условиям осаждения. При использовании метода МОСVD с различными прекурсорами [13,14]:

- при 400–550°C формируются высококачественные пленки;

- при 575°C из прекурсора $Zr(thd)_4$ вырастают хорошо окристаллизованные пленки с фасетированными зернами, тогда как из $Zr(pd)_4$ и $Zr(tbob)_4$ - плохо окристаллизованные и с трещинами.

Остаточные напряжения возникают из-за термического несоответствия покрытия и подложки, а также дефектов роста. Оптимизация температуры позволяет снизить напряжения, например, путём отжига *in situ*. Показано, что пленки ZrO_2 , осажденные из прекурсора ZTB при 300°C, сохраняют аморфную структуру после отжига при 900°C, тогда как пленки из TDEAZ кристаллизуются в моноклинную фазу [13, 17].

4. Практическая реализация на примере покрытий из диоксида циркония.

Диоксид циркония является одним из наиболее значимых керамических материалов для термобарьерных покрытий, высоко-к диэлектриков и твёрдых электролитов. Обобщение данных термодинамического моделирования и кинетических исследований позволяет выделить параметры, обеспечивающие получение покрытий ZrO_2 с заданными свойствами [8-12,15,16].

Рекомендуемые параметры осаждения покрытий ZrO_2 из газовой фазы в зависимости от требуемых свойств представлены в таблице.

Таблица - Рекомендуемые параметры осаждения покрытий ZrO_2 из газовой фазы в зависимости от требуемых свойств

Целевое свойство	Рекомендуемые параметры
Однофазный моноклинный ZrO_2	$T > 800$ °C; $P < 10^5$ Па; $O/Zr > 4$; $H/C < 10$.
Высокая скорость роста (>2 мг·см ⁻² ·ч ⁻¹)	$T > 800$ °C; оптимизация расхода для диффузионного режима; $Kn < 0,1$.
Хорошо окристаллизованные плёнки	Использование $Zr(thd)_4$; $T \approx 575$ °C.
Плёнки с низким содержанием примесей	Использование ZTB; низкие температуры 300–400 °C с последующим быстрым термическим отжигом.
Термобарьерные покрытия YSZ	CVD в системе $ZrCl_4$ - YCl_3 - H_2 - CO_2 -Ar с термодинамическим расчётом для стабилизации кубической фазы.
PVD-покрытия при низких температурах	Электронно-лучевое испарение; $T_s = 30$ -50 °C для аморфных или нанокристаллических конденсатов.
Высокоплотные конформные покрытия	Низкое давление (около 100 Па); $Kn = 0,01$ -0,1; температура в переходной области.

Представленные данные показывают, что совместный учёт термодинамических и кинетических ограничений, а также транспортных свойств газовой фазы позволяет целенаправленно выбирать режимы осаждения для получения покрытий с требуемыми характеристиками. На примере ZrO_2 прослеживается прямая связь между параметрами процесса, фазовым составом, степенью кристалличности и плотностью покрытия [8-18, 19, 21].

Выводы

Основные критерии осаждения покрытий из газовой фазы целесообразно разделять на термодинамические и кинетические. Термодинамические параметры определяют возможность образования целевой фазы, тогда как кинетические задают скорость процесса, лимитирующую стадию и механизм роста покрытия. Температура подложки, давление и состав газовой смеси одновременно влияют на равновесие, массоперенос, морфологию и дефектность формируемого слоя. Транспортные свойства газовой фазы – динамическая вязкость, плотность и длина свободного пробега – через число Кнудсена определяют режим течения и, как следствие, конформность и плотность покрытия. На примере диоксида циркония показано, что рациональный выбор прекурсора, температуры, давления и соотношения реагентов обеспечивает управление фазовым составом, кристалличностью и эксплуатационными свойствами покрытия. Для проектирования технологического процесса необходим совместный термодинамический, кинетический и гидродинамический анализ [1-5, 8-12, 19-23].

Список литературы:

1. Hitchman M.L., Jensen K.F. *Chemical Vapor Deposition: Principles and Applications*. Academic Press, New York, 1993. 560 p.
2. Pierson H.O. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology, and Applications*. 2nd ed. Noyes Publications, 1999. 506 p.
3. Bunshah R.F. (ed.) *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*. 3rd ed. William Andrew Publishing, 2010. 1200 p.
4. Ohring M. *Materials Science of Thin Films*. 2nd ed. Academic Press, 2002. 794 p.
5. Jones A.C., Hitchman M.L. (eds.) *Chemical Vapour Deposition: Precursors, Processes and Applications*. Royal Society of Chemistry, 2009. 582 p.
6. Smith D.L. *Thin-Film Deposition: Principles and Practice*. McGraw-Hill, 1995. 616 p.
7. Mattox D.M. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. 2nd ed. Elsevier, 2010. 792 p.
8. Varanasi V.G., Besmann T.M., Payzant E.A., Starr T.L., Anderson T.J. Thermodynamic analysis and growth of ZrO₂ by chloride chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, no. 18, pp. 6133–6139. DOI: 10.1016/j.tsf.2007.11.075.
9. Akiyama Y., Sato T., Imaishi N. Reaction analysis for ZrO₂ and Y₂O₃ thin film growth by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition using β-diketonate complexes. *Journal of Crystal Growth*, 1995, vol. 147, no. 1-2, pp. 130–146. DOI: 10.1016/0022-0248(94)00623-7.
10. Cho W.H. et al. Effects of the reaction parameters on the deposition characteristics in ZrO₂ CVD. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1992, vol. 3, no. 2, pp. 87–92. DOI: 10.1007/BF00701163.
11. Kawamoto T., Shimogaki Y. Precise control of CVD-ZrO₂ film properties based on kinetic information. *MRS Online Proceedings Library*, 2002, vol. 745, p. N5.6. DOI: 10.1557/PROC-745-N5.6.
12. Sipp E. *CVD/CVI of ceramics based on pure or stabilized zirconia: thermodynamic and experimental approach*. PhD Thesis. Université de Bordeaux, 1990. HAL tel-03624161.
13. Dharmaprakash M.S., Shivashankar S.A. Effect of Nature of the Precursor on Crystallinity and Microstructure of MOCVD-Grown ZrO₂ Thin Films. *MRS Online Proceedings Letters*, 2003, vol. 745, p. N5.14. DOI: 10.1557/PROC-745-N5.14.
14. Codato S., Carta G., Rossetto G., Rizzi G.A., Zanella P., Scardi P., Leoni M. MOCVD Growth and Characterization of ZrO₂ Thin Films Obtained from Unusual Organo-Zirconium

- Precursors. *Chemical Vapor Deposition*, 1999, vol. 5, no. 4, pp. 159–166. DOI: 10.1002/(SICI)1521-3862(199908)5:4<159: AID-CVDE159>3.0.CO;2-E.
15. Smith R.C., Hoilien N., Taylor C.J. et al. *Journal of the Electrochemical Society*, 2000, vol. 147, p. 3472.
 16. Turgambaeva A.E., Krisyuk V.V., Bykov A.F., Igumenov I.K. *Journal de Physique IV*, 1999, Pr8-65.
 17. Devi A., Goswami J., Lakshmi R., Shivashankar S.A. *Journal of Materials Research*, 1998, vol. 13, p. 687.
 18. Зайцев Ю.П., Мовчан Б.А., Дидикин Г.Г., Оранская Е.И. Наноразмерная структура конденсатов ZrO_2 – Y_2O_3 , осажденных из паровой фазы в вакууме. *Украинский химический журнал*, 2012, т. 78, № 4, с. 86–93.
 19. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. *Transport Phenomena*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2002. 912 p.
 20. Roth A. *Vacuum Technology*. 3rd ed. Elsevier, 1990. 560 p.
 21. Kleijn C.R., Hoogendoorn C.J. A mathematical model for LPCVD in a single wafer reactor. *Chemical Engineering Science*, 1991, vol. 46, no. 12, pp. 3217–3229.
 22. Дорохов А.А., Кузнецов Д.В. Влияние кислорода на полиморфизм оксида циркония, получаемого из ацетилацетоната циркония методом CVD. *Естественные и технические науки*, 2025, № 4(203), с. 324–333.
 23. Middleman S., Hochberg A.K. *Process Engineering Analysis in Semiconductor Device Fabrication*. McGraw-Hill, 1993. 744 p.

References:

1. Hitchman M.L., Jensen K.F. *Chemical Vapor Deposition: Principles and Applications*. Academic Press, New York, 1993. 560 p.
2. Pierson H.O. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD): Principles, Technology, and Applications*. 2nd ed. Noyes Publications, 1999. 506 p.
3. Bunshah R.F. (Ed.) *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings*. 3rd ed. William Andrew Publishing, 2010. 1200 p.
4. Ohring M. *Materials Science of Thin Films*. 2nd ed. Academic Press, 2002. 794 p.
5. Jones A.C., Hitchman M.L. (Eds.) *Chemical Vapour Deposition: Precursors, Processes and Applications*. Royal Society of Chemistry, 2009. 582 p.
6. Smith D.L. *Thin-Film Deposition: Principles and Practice*. McGraw-Hill, 1995. 616 p.
7. Mattox D.M. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. 2nd ed. Elsevier, 2010. 792 p.
8. Varanasi V.G., Besmann T.M., Payzant E.A., Starr T.L., Anderson T.J. Thermodynamic analysis and growth of ZrO_2 by chloride chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, no. 18, pp. 6133–6139. DOI: 10.1016/j.tsf.2007.11.075.
9. Akiyama Y., Sato T., Imaishi N. Reaction analysis for ZrO_2 and Y_2O_3 thin film growth by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition using β -diketonate complexes. *Journal of Crystal Growth*, 1995, vol. 147, no. 1-2, pp. 130–146. DOI: 10.1016/0022-0248(94)00623-7.

10. Cho W.H. et al. Effects of the reaction parameters on the deposition characteristics in ZrO₂ CVD. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1992, vol. 3, no. 2, pp. 87–92. DOI: 10.1007/BF00701163.
11. Kawamoto T., Shimogaki Y. Precise control of CVD-ZrO₂ film properties based on kinetic information. *MRS Online Proceedings Library*, 2002, vol. 745, p. N5.6. DOI: 10.1557/PROC-745-N5.6.
12. Sipp E. CVD/CVI of ceramics based on pure or stabilized zirconia: thermodynamic and experimental approach. PhD Thesis. Université de Bordeaux, 1990. HAL tel-03624161.
13. Dharmaprakash M.S., Shivashankar S.A. Effect of Nature of the Precursor on Crystallinity and Microstructure of MOCVD-Grown ZrO₂ Thin Films. *MRS Online Proceedings Letters*, 2003, vol. 745, p. N5.14. DOI: 10.1557/PROC-745-N5.14.
14. Codato S., Carta G., Rossetto G., Rizzi G.A., Zanella P., Scardi P., Leoni M. MOCVD Growth and Characterization of ZrO₂ Thin Films Obtained from Unusual Organo-Zirconium Precursors. *Chemical Vapor Deposition*, 1999, vol. 5, no. 4, pp. 159–166. DOI: 10.1002/(SICI)1521-3862(199908)5:4<159::AID-CVDE159>3.0.CO;2-E.
15. Smith R.C., Hoilien N., Taylor C.J. et al. *Journal of the Electrochemical Society*, 2000, vol. 147, p. 3472.
16. Turgambaeva A.E., Krisyuk V.V., Bykov A.F., Igumenov I.K. *Journal de Physique IV*, 1999, Pr8-65.
17. Devi A., Goswami J., Lakshmi R., Shivashankar S.A. *Journal of Materials Research*, 1998, vol. 13, p. 687.
18. Zaytsev Yu.P., Movchan B.A., Didykin G.G., Oranskaya E.I. Nanorazmernaya struktura kondensatov ZrO₂-Y₂O₃, osazhdennykh iz parovoy fazy v vakuume [Nanoscale structure of ZrO₂-Y₂O₃ condensates deposited from the vapor phase in vacuum]. *Ukrainskiy khimicheskii zhurnal*, 2012, vol. 78, no. 4, pp. 86–93. (In Russian).
19. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. *Transport Phenomena*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2002. 912 p.
20. Roth A. *Vacuum Technology*. 3rd ed. Elsevier, 1990. 560 p.
21. Kleijn C.R., Hoogendoorn C.J. A mathematical model for LPCVD in a single wafer reactor. *Chemical Engineering Science*, 1991, vol. 46, no. 12, pp. 3217–3229.
22. Dorokhov A.A., Kuznetsov D.V. Vliyanie kisloroda na polimorfizm oksida tsirkoniya, poluchaemogo iz atsetilatsetonata tsirkoniya metodom CVD [Effect of oxygen on the polymorphism of zirconium oxide obtained from zirconium acetylacetonate by CVD]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2025, no. 4(203), pp. 324–333. (In Russian).
23. Middleman S., Hochberg A.K. *Process Engineering Analysis in Semiconductor Device Fabrication*. McGraw-Hill, 1993. 744 p.