

УДК 54.057

## ПРЯМОЙ ОДНОСТАДИЙНЫЙ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК СИСТЕМЫ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GaN РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

© 2024 г. Л. А. Мочалов<sup>1</sup>, М. А. Кудряшов<sup>1</sup>, М. А. Вшивцев<sup>1,\*</sup>,  
Ю. П. Кудряшова<sup>1</sup>, И. О. Прохоров<sup>1</sup>, А. В. Князев<sup>1</sup>, А. В. Алмаев<sup>2</sup>,  
Н. Н. Яковлев<sup>2</sup>, Е. В. Черников<sup>2</sup>, Н. Н. Ерзакова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>ООО “Фокон”, г. Калуга

\*E-mail: mvshivtcev@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2023 г.

После доработки 17.01.2024 г.

Принята к публикации 18.01.2024 г.

Впервые наноструктурированные тонкие пленки системы  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GaN были получены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) на подложках из с-сапфира. Металлический высокочистый галлий, а также высокочистые газообразные азот и кислород использовали в качестве источников макрокомпонентов. Низкотемпературная неравновесная плазма индуктивно-связанного ВЧ (40.68 МГц) разряда при пониженном давлении (0.01 Торр) являлась инициатором химических превращений между исходными веществами. В качестве плазмообразующего газа использовали смесь кислорода и азота. Плазмохимический процесс был изучен с помощью метода оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС). Полученные тонкие пленки системы  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GaN с содержанием фазы GaN от 2 до 7% были охарактеризованы различными аналитическими методами.

*Ключевые слова:* тонкие пленки, газовые сенсоры, оксид галлия

DOI: 10.31857/S0023119324030055 EDN: UUOVPB

### ВВЕДЕНИЕ

Благодаря достижениям в области получения полупроводниковых материалов широкое развитие получили газовые сенсоры резистивного и диодного типов на основе оксида галлия [1, 2]. По сравнению с другими металлооксидными полупроводниками (SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WO<sub>3</sub> и ZnO) использование  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в качестве чувствительного материала позволяет создавать газовые сенсоры, которые обладают стабильными характеристиками при высоких рабочих температурах и низких концентрациях кислорода и слабо подвержены влиянию окружающей среды [1, 3–5]. Эти преимущества являются определяющими при разработке высокотемпературных газовых сенсоров [6, 7]. Принято считать газовые сенсоры высокотемпературными, если их рабочие температуры выше 600°C.

Газочувствительные свойства  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, особенно легированного различными примесями, исследованы значительно слабее других металлооксидных полупроводников. Первые упоминания об резистивных сенсорах на основе этого материала появились на рубеже 80–90 гг. прошлого столетия, в которых

пленки  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были получены методом магнетронного распыления [4, 8]. Позже оксид галлия стали получать с использованием метода Чохральского [9], термического испарения [10], спрей-пиролиза [11] и золь-гель метода [12].

Необходимость оптимизации электропроводящих, оптических или газочувствительных свойств  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> требует развития новых методов получения этого материала с возможностью точного задания толщины, стехиометрии и концентрации допирующего агента. С этой точки зрения наиболее привлекательным и перспективным считается плазмохимический метод получения пленок полупроводников (PECVD) [13, 14], который позволяет получать материалы различного фазового состава в условиях гетероэпитаксиального роста, а также легировать тонкие пленки непосредственно в процессе осаждения без потери вакуума. Для  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> одной из легирующих примесей может являться азот, который способен замещать кислородные вакансии в исходном оксиде галлия. В современной литературе пока опубликовано немного сообщений о легировании тонких пленок  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> азотом. Например, авторам

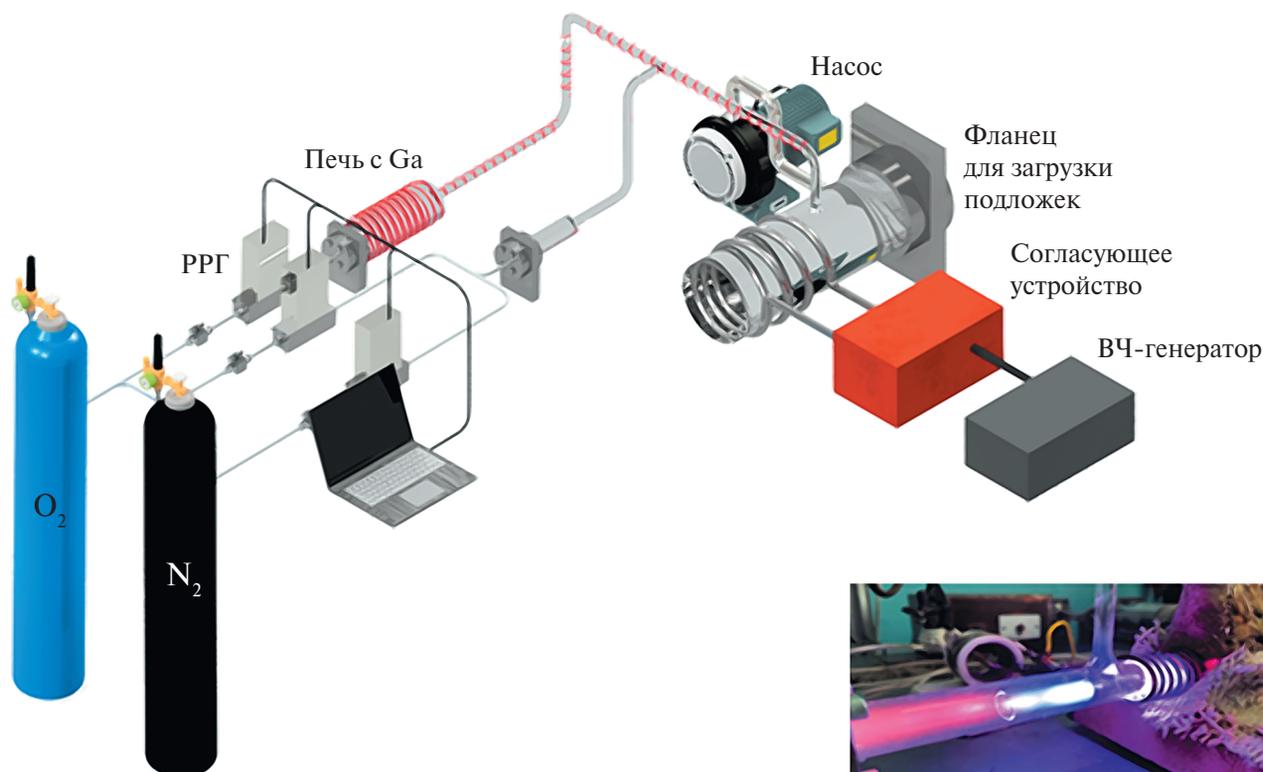


Рис. 1. Схематическое изображение плазмохимической установки синтеза тонких пленок  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaN}$ .

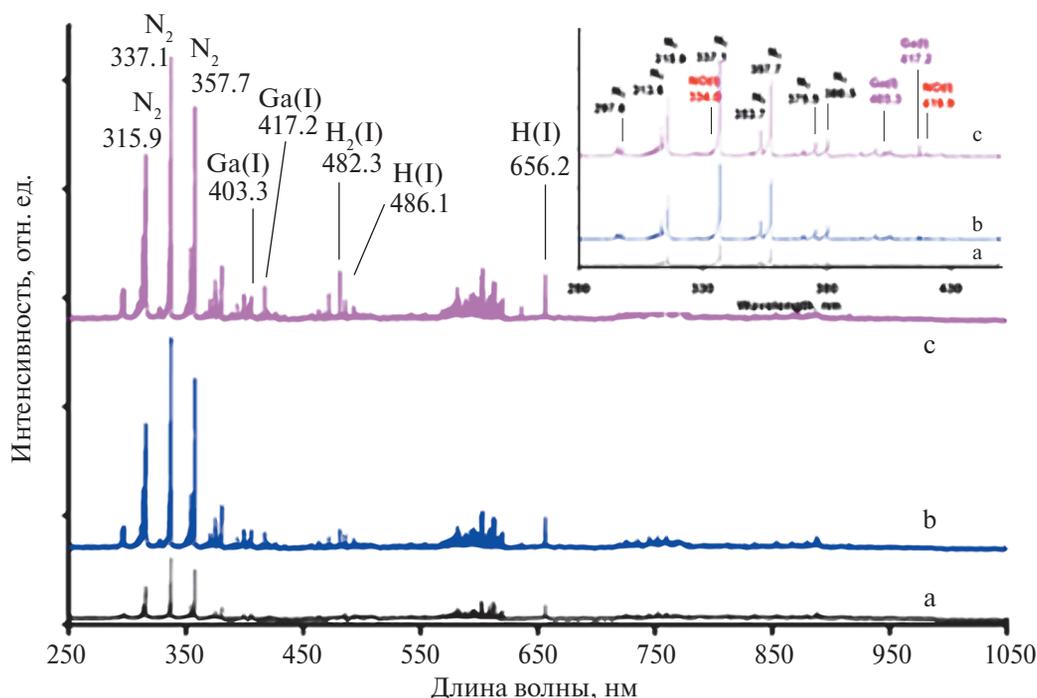
работы [15] удалось достичь эффекта внедрения атомов азота в структуру  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  за счет длительного отжига в атмосфере  $\text{N}_2\text{-O}_2\text{-Ar}$ . Установлено, что инкорпорированный азот улучшает качество кристаллической структуры пленок. В работе [16] тонкие пленки  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  были допированы азотом методом ионной имплантации. Методом CVD, используя аммиак в качестве источника легирующей примеси, были получены наноструктуры оксида галлия, легированные азотом [17], морфология которых сильно зависела от степени легирования. Также пленки  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , легированные азотом, могут быть выращены методом ВЧ-магнетронного распыления с использованием либо азота [18], либо аммиака [19]. В работе [20] приводится пример аммонолиза смеси порошков оксида галлия различных фаз аммиаком. Вышеупомянутые способы допирования материалов и структур на основе  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  обладают существенными недостатками, а именно: многостадийность и длительность процессов, низкая производительность, необходимость контролирования профиля легирования и т.д.

Целью данной работы является прямой одностадийный плазмохимический синтез наноструктурированных тонких пленок  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , легированных азотом, изучение влияния содержания азота на структуру пленок системы  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaN}$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Схематическое изображение установки синтеза тонких пленок системы  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaN}$  приведено на рис. 1. Детальное описание установки также приводится нами в работах [21, 22].

Пары высокочистого галлия 5 N в элементарном виде доставлялись потоком газа-носителя (высокоочищенный водород (99.9999 об. %) по нагреваемой кварцевой линии в крестообразное устройство смешения из высокочистого кварца, снабженное внешним нагревателем. Газообразный высокочистый  $\text{N}_2$  (99.999 об. %) в смеси с кислородом (99.999 об. %) подавался непосредственно в плазмообразующую смесь. Инициирование реакции взаимодействия элементов происходило за счет механизмов электронного удара/электронного прилипания в плазменном разряде, твердые продукты реакции осаждались на нагреваемую до  $350^\circ\text{C}$  подложку, выполненную из высокочистого ориентированного полированного сапфира. Таким образом были синтезированы тонкие пленки системы  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaN}$  с содержанием фазы GaN от 2 до 7%. Исследования неравновесной плазмы осуществляли методом ОЭС при помощи спектрометра AvaSpec-Mini4096CL (UV + VIS + NIR) (Avantes, Голландия) в диапазоне 180–1100 нм с разрешением 0.12 нм. Морфологическое состояние поверхности пленок изучали



**Рис. 2.** Эмиссионный спектр плазмы смеси Ga-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> при различном содержании азота: а – 1%; б – 3%; с – 7%. Во вставке представлен участок спектра в диапазоне 280–1100 нм.

методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием сканирующего зондового микроскопа SPM-9700 (Shimadzu, Япония) в контактном режиме с применением кремниевых кантилеверов с высоким аспектным отношением Etalon Premium PHA\_NC (TipsNano, Эстония) с коэффициентом жесткости 3.5 Н/м и типичным радиусом острия не более 5 нм (гарантированно – не более 8 нм). Исследования методами сканирующей электронной микроскопией (СЭМ) и рентгеновским микроанализом были выполнены на установке СЭМ JSM IT-300LV (JEOL) с энергодисперсионной приставкой X-MaxN 20 (Oxford Instruments). Спектры комбинационного рассеяния были получены с использованием системы конфокальной спектроскопии комбинационного рассеяния Alpha 300 AR (WiTec, Германия). Твердотельный лазер с рабочей длиной волны 488 нм фокусировался на поверхность образца объективом ×100 (ЧА = 0,75). Рассеянный свет собирался тем же объективом в геометрии обратного рассеяния.

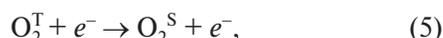
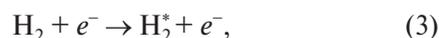
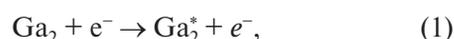
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Оптическая эмиссионная диагностика плазмохимического процесса

Для определения возбужденных частиц в плазме, а также предположения возможного механизма плазмохимического процесса была выполнена оптическая эмиссионная диагностика. Эмиссионные спектры плазмы смеси Ga-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> при различ-

ном содержании азота: а – 1%; б – 3%; в – 7% представлены на рис. 2. Во вставке представлен участок спектра в диапазоне 280–1100 нм.

В диапазоне 450–900 нм наблюдаются молекулярные и атомарные линии возбужденных частиц водорода и кислорода. Достаточно интенсивные эмиссионные линии атомов галлия Ga(I) наблюдаются при 403.30, 417.20 нм. Ранее было показано [23–25], что в условиях плазменного разряда протекают следующие элементарные реакции (1)–(9):



При добавлении азота к смеси Ga-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> в спектре плазмы наблюдаются эмиссионные линии N<sub>2</sub> (296.71, 313.62, 315.90, 337.11, 353.74, 357.71 и 380.51 нм). Возбуждение молекулы азота электронным ударом протекает по реакции:

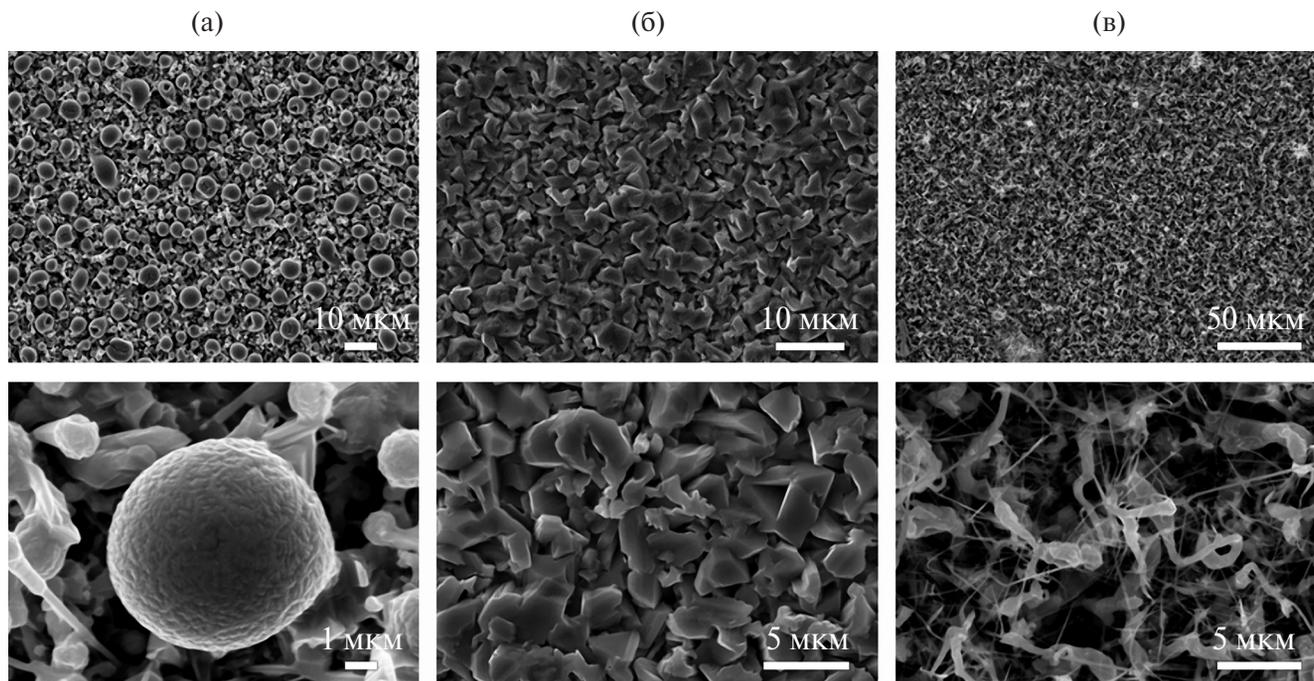
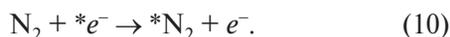


Рис. 3. СЭМ-изображения образцов оксида галлия, легированных нитридом галлия. Верхний ряд шкала – 1 мкм, нижний ряд шкала – 100 нм.



Кроме того, в спектре присутствуют слабые линии при 334.01 и 419.93 нм, отнесенные к возбужденным молекулам NO, и очень слабые – линии при 388.43 и 391.44 нм (переходы  $\text{N}_2(\text{B}^2\Sigma_u^+) \rightarrow \text{N}_2(\text{X}^2\Sigma_g^+)$ ), характерные для катионов  $\text{N}_2^+$ . Поскольку в спектре плазмы отсутствуют характерные интенсивные линии при 745.82 и 869.01 нм, можно заключить, что в наших условиях не происходит диссоциации азота на атомы. Образование окиси азота является результатом протекания следующих реакций (11), (12):



Высоко реакционноспособные радикалы атомов азота могут взаимодействовать с другими компонентами плазмообразующей смеси с образованием, в том числе фазы нитрида галлия (13):



Таким образом, образование оксида галлия в смеси ( $\text{O}_2 + \text{N}_2$ ) возможно как минимум по двум механизмам – непосредственным окислением кислородом, а также оксидом азота. На подложках из с-сапфира были получены образцы тонких пленок  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , легированных азотом, при этом содержание GaN варьировалось от 0 до 7 ат. %.

#### Сканирующая электронная микроскопия

Морфология поверхности образцов была изучена методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Полученные СЭМ-изображения приведены на рис. 3. Можно отметить, что размер и форма структурных фрагментов существенно различны. Поверхность образца с минимальным содержанием GaN 2% (рис. 3а) образована мелкими кристаллами с размерами от нескольких сотен нанометров до 1 мкм и сферическими частицами с размерами в несколько микрон. Увеличение содержания нитрида галлия до 5% (рис. 3б) приводит к существенному изменению морфологии поверхности, структура которой сформирована главным образом из поликристаллических “чешуек” со средним размером 1–3 мкм. Дальнейшее увеличение содержания нитрида галлия до 7% (рис. 3с) приводит к образованию нитевидных нанокристаллических структур толщиной несколько десятков нанометров в окружении поликристаллических фрагментов с размерами от одного до нескольких микрон.

#### Атомно-силовая микроскопия (АСМ)

Образцы полученных материалов были изучены методом АСМ, данные представлены на рис. 4.

Ввиду высокой шероховатости поверхности удалось получить изображение только одного образца состава ( $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3 - 95\% - \text{GaN} - 5\%$ ), при этом  $R_a$  —

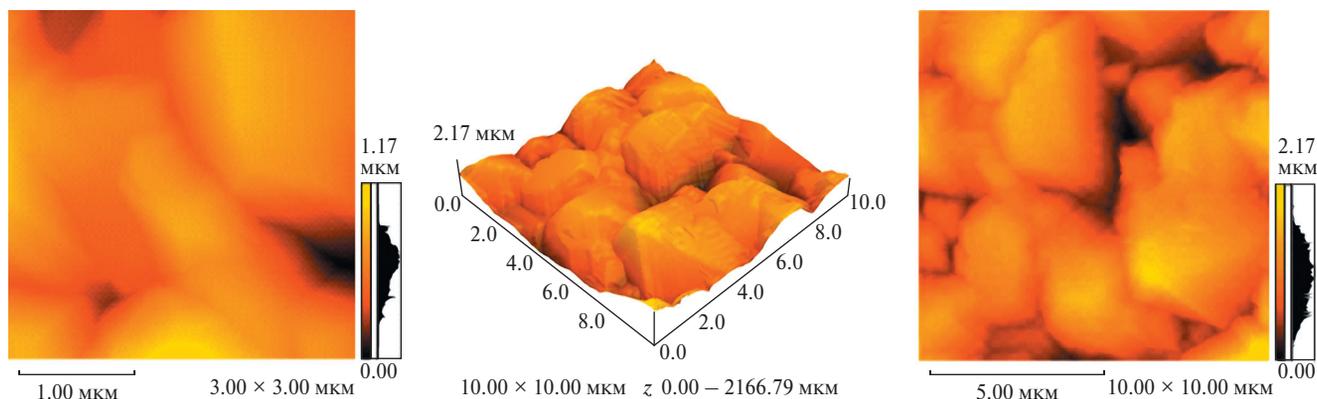


Рис. 4. АСМ-изображение поликристаллического образца оксида галлия, легированного нитридом галлия ( $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-95\% - GaN-5\%$ ).

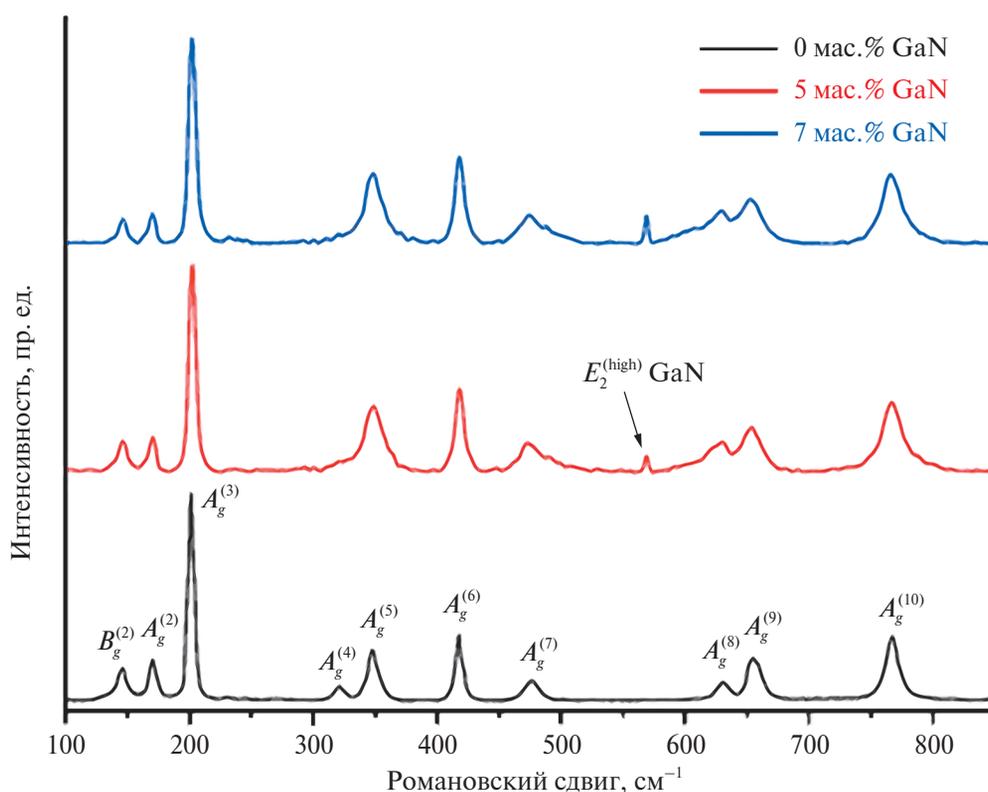


Рис. 5. Спектры КРС пленок оксида галлия, допированных GaN с разной концентрацией легирования.

средняя арифметическая шероховатость поверхности составила 144.34 нм,  $R_q$  — средняя квадратичная шероховатость 179.70 нм и  $R_z$  — шероховатость поверхности по выбранным десяти максимальным высотам и впадинам (среднее абсолютное значение пяти наивысочайших пиков и пяти самых глубоких впадин) — 576.57 нм. Таким образом данные, полученные методом АСМ, еще раз косвенно подтверждают, что осажденные пленки имеют поликристаллическую структуру с высокой шероховатостью.

## РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Спектры комбинационного рассеяния света пленок  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , легированных нитридом галлия, показаны на рис. 5. Комбинационно-активные моды у  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  следующие: моды растяжения и изгиба тетраэдра  $\text{GaO}_4$  на высоких частотах (770–500  $\text{cm}^{-1}$ ), моды деформации октаэдра  $\text{GaO}_6$  на средних частотах (480–310  $\text{cm}^{-1}$ ) и колебательные и трансляционные моды цепочек тетраэдров и октаэдров на низких частотах (200  $\text{cm}^{-1}$  и менее) [26].

Из рис. 5 видно, что пики комбинационного рассеяния от оксида галлия почти не изменяются после введения азота в плазмообразующую смесь за исключением моды  $A_g^{(4)}$ . Однако на спектрах КРС для пленок, легированных нитридом галлия, отчетливо наблюдается полоса вблизи  $569 \text{ см}^{-1}$ , относящаяся к высокочастотной фононной моде  $E_2^{(\text{high})}$  от GaN [27]. Таким образом, появление фазы GaN практически не оказывает влияния на кристаллическую решетку  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ .

### ВЫВОДЫ

Методом плазмохимического осаждения из газовой фазы получены наноструктурированные тонкие пленки системы  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GaN}$  с содержанием фазы GaN от 2 до 7%. Материалы охарактеризованы методами СЭМ, АСМ и КРС. Показано, что морфология поверхности существенно меняется при увеличении содержания фазы GaN – от сферических частиц с размерами в несколько микрон (2% GaN) до нитевидных нанокристаллических структур толщиной несколько десятков нанометров в окружении поликристаллических фрагментов с размерами от одного до нескольких микрон (7% GaN). Согласно рамановским спектрам появление фазы GaN не оказывает существенного влияния на кристаллическую решетку  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ . Показано, что пленки представляют интерес для разработки на их основе сенсоров различных газов.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-13-00053 “Разработка научных основ технологии получения хеморезистивных материалов для электронного носа на основе сложных наноструктурированных оксидных матриц”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Afzal A. // J. Materiomics. 2019. V. 5. № 4. P. 542.
2. Jang S., Jung S., Kim J. et al. // ECS J Solid State Sci Technol. 2018. V. 7. № 7. P. 3180.
3. Hoefler U., Frank J., Fleischer M. // Sens. Actuators B Chem. 2001. V. 78. № 1. P. 6.
4. Lampe U., M. Fleischer M., Meixner H. // Sens. Actuators B Chem. 1994. V. 17. P. 187.
5. Fleischer M., Hanrieder W., Meixner H. // Thin Solid Films. 1990. V. 190. P. 93.
6. Liu Y., Parisi J., Sun X., Lei Y. // J. Mater. Chem. A. 2014. V. 2 P.9919.
7. Ghosh A., Zhang C., Shi S.Q., Zhang H. // Clean – Soil, Air, Water. 2019. V. 47. P. 1800491.
8. Fleischer M., Giber J., Meixner H. // Appl. Phys. 1992. V. 54. P. 560.
9. Bartic M. // Phys Status Solidi. 2016. V. 213. P. 457.
10. Liu Z., Yamazaki T., Shen Y. et al. // Sens Actuators B Chem. 2008. V. 129. P. 666.
11. Pandeeswari R., Jeyaprakash B.G. // Sens Actuators B Chem. 2014. V. 195. P. 206.
12. Li Y., Trinchì A., Włodarski W. et al. // Sens Actuators B Chem. 2003. V. 93. P. 431.
13. Mochalov L., Logunov A., Kudryashov M. et al. // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2021. V. 10. P. 073002.
14. Mochalov L.A., Logunov A.A., Prokhorov I.O. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1967. P. 012036.
15. Zhang H., Deng J.X., Kong L. et al. // Micro & Nano Lett. 2019. V. 14. P. 62.
16. Suzhen L., Linpeng D. Xiaofan M. J. // J. Alloys Compd. 2020. V. 812. P. 1520262.
17. Liu L.L., Li M.K., Yu D.Q. // Appl. Phys. A. 2010. V. 98. P. 831.
18. Sun R., Zhang H.-Y., Wang G.-G. et al. // Superlattices Microstruct. 2014. V. 65. P. 146.
19. Zhang Y., Yan J., Li Q. et al. // Physica B. V. 406. P. 3079.
20. Roehrens D. // J. Solid State Chem. 2010. V. 183. P. 532.
21. Mochalov L.A., Logunov A.A., Kudryashov M.A. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1967. P. 012037.
22. Mochalov L., Logunov A., Gogova D. et al. // Opt Quantum Electron. 2020. V. 52. P. 510.
23. Bagolini A., Gaiardo A., Crivellari M. et al. // Sens Actuator B Chem. 2019. V. 292. P. 225.
24. Mochalov L., Logunov A., Vorotyntsev V. // Sep. Purif. Technol. 2021 V. 258. P. 118001.
25. Mochalov L., Logunov A., Kitnis A. et al. // Sep. Purif. Technol. 2020. V. 238. P.116446.
26. Logunov A., Mochalov L., Gogova D., Vorotyntsev V. // International Conference on Transparent Optical Networks. 2019. P. 8840331.
27. Yanyan Z., Ray L. Frost. // J. Raman Spectrosc. 2008. V. 39. P. 1494.

## DIRECT ONE-STAGE PLASMA CHEMICAL SYNTHESIS OF NANOSTRUCTURED THIN FILMS OF THE SYSTEM $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -GaN OF DIFFERENT COMPOSITION

L. A. Mochalov<sup>a</sup>, M. A. Kudryashova<sup>a</sup>, M. A. Vshivtsev<sup>a,\*</sup>,  
Yu. P. Kudryashov<sup>a</sup>, I. O. Prokhorov<sup>a</sup>, A.V. Knyazev<sup>a</sup>, A.V. Almaev<sup>b</sup>,  
N. N. Yakovlev<sup>b</sup>, E. V. Chernikov<sup>b</sup>, N. N. Erzakova<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Lobachevsky Nizhny Novgorod State University

<sup>b</sup>Focon LLC, Kaluga

\*E-mail: mvshivtcev@mail.ru

For the first time, nanostructured thin films of the  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -GaN system were obtained by plasma chemical deposition from the gas phase (PECVD) on c-sapphire substrates. High-purity metallic gallium, as well as high-purity gaseous nitrogen and oxygen were used as sources of macro components. The low-temperature nonequilibrium plasma of an inductively coupled HF (40.68 MHz) discharge at a reduced pressure (0.01 Torr) was the initiator of chemical transformations between the starting substances. A mixture of oxygen and nitrogen was used as a plasma-forming gas. The plasma chemical process was studied using the optical emission spectroscopy (OES) method. The obtained thin films of the  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -GaN system with a GaN phase content of 2 to 7% were characterized by various analytical methods.

*Keywords:* thin films, gas sensors, gallium oxide

### REFERENCES

1. Afzal A. // J. Materiomics. 2019. V. 5. № 4. P. 542.
2. Jang S., Jung S., Kim J. et al. // ECS J Solid State Sci Technol. 2018. V. 7. № 7. P. 3180.
3. Hoefer U., Frank J., Fleischer M. // Sens. Actuators B Chem. 2001. V. 78. № 1. P. 6.
4. Lampe U., M. Fleischer M., Meixner H. // Sens. Actuators B Chem. 1994. V. 17. P. 187.
5. Fleischer M., Hanrieder W., Meixner H. // Thin Solid Films. 1990. V. 190. P. 93.
6. Liu Y., Parisi J., Sun X., Lei Y. // J. Mater. Chem. A. 2014. V. 2 P.9919.
7. Ghosh A., Zhang C., Shi S.Q., Zhang H. // Clean – Soil, Air, Water. 2019. V. 47. P. 1800491.
8. Fleischer M., Giber J., Meixner H. // Appl. Phys. 1992. V. 54. P. 560.
9. Bartic M. // Phys Status Solidi. 2016. V. 213. P. 457.
10. Liu Z., Yamazaki T., Shen Y. et al. // Sens Actuators B Chem. 2008. V. 129. P. 666.
11. Pandeewari R., Jeyaprakash B.G. // Sens Actuators B Chem. 2014. V. 195. P. 206.
12. Li Y., Trinchì A., Wlodarski W. et al. // Sens Actuators B Chem. 2003. V. 93. P. 431.
13. Mochalov L., Logunov A., Kudryashov M. et al. // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2021. V. 10. P. 073002.
14. Mochalov L.A., Logunov A.A., Prokhorov I.O. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1967. P. 012036.
15. Zhang H., Deng J.X., Kong L. et al. // Micro & Nano Lett. 2019. V. 14. P. 62.
16. Suzhen L., Linpeng D. Xiaofan M. J. // J. Alloys Compd. 2020. V. 812. P. 1520262.
17. Liu L.L., Li M.K., Yu D.Q. // Appl. Phys. A. 2010. V. 98. P. 831.
18. Sun R., Zhang H.-Y., Wang G.-G. et al. // Superlattices Microstruct. 2014. V. 65. P. 146.
19. Zhang Y., Yan J., Li Q. et al. // Physica B. V. 406. P. 3079.
20. Roehrens D. // J. Solid State Chem. 2010. V. 183. P. 532.
21. Mochalov L.A., Logunov A.A., Kudryashov M.A. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1967. P. 012037.
22. Mochalov L., Logunov A., Gogova D. et al. // Opt Quantum Electron. 2020. V. 52. P. 510.
23. Bagolini A., Gaiardo A., Crivellari M. et al. // Sens Actuator B Chem. 2019. V. 292. P. 225.
24. Mochalov L., Logunov A., Vorotyntsev V. // Sep. Purif. Technol. 2021 V. 258. P. 118001.
25. Mochalov L., Logunov A., Kitnis A. et al. // Sep. Purif. Technol. 2020. V. 238. P.116446.
26. Logunov A., Mochalov L., Gogova D., Vorotyntsev V. // International Conference on Transparent Optical Networks. 2019. P. 8840331.
27. Yanyan Z., Ray L. Frost. // J. Raman Spectrosc. 2008. V. 39. P. 1494.