



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-40-47>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 544.653.23, 539.232, 535.372

## АНОДНАЯ КОМПОЗИЦИОННАЯ НАНОСТРУКТУРА: ФОРМИРОВАНИЕ, МОРФОЛОГИЯ, ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА

А.В. ГОГА, А.А. ПОЗНЯК, С.М. ЗАВАДСКИЙ, Д.А. ГОЛОСОВ, А.Н. ПЛИГОВКА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 18 марта 2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Двухслойная система Al/Nb (1000/200 нм) на кремниевой подложке была проанодирована в 0,2 М водном растворе щавелевой кислоты при постоянном напряжении 53 В. После завершения этапа анодирования алюминия производили замену электролита на 0,5 М водный раствор борной кислоты и затем реанодировали подслои ниобия до напряжения 400 В. Для создания анодной композиционной наноструктуры проводили удаление большей части анодного оксида алюминия методом химического травления в течение 1200 с в 50 % растворе ортофосфорной кислоты при температуре 50 °С. Исследована морфология, фотолюминесценция, оптическое отражение анодной композиционной наноструктуры. Анодная композиционная наноструктура показала эффективное оптическое отражение в диапазоне длин волн от 540 до 1000 нм, а максимальная отражающая эффективность наблюдалась на длине волны 850 нм и составляет 52 %. Пик фотолюминесценции наблюдался на длине волны 453 нм.

**Ключевые слова:** высокое аспектное соотношение, переизлучение, наноструктурирование, наноматериал, ниобий, оксид ниобия, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NbO<sub>2</sub>, ширина запрещенной зоны.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Авторы признательны Е.Б. Чубенко (НИЛ 4.3 НИЧ БГУИР) за помощь в проведении исследований фотолюминесценции.

**Для цитирования.** Гога А.В., Позняк А.А., Завадский С.М., Голосов Д.А., Плиговка А.Н. Анодная композиционная наноструктура: формирование, морфология, оптические и фотолюминесцентные свойства. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 40-47.

## ANODIC COMPOSITE NANOSTRUCTURE: FORMATION, MORPHOLOGY, OPTICAL AND PHOTOLUMINESCENT PROPERTIES

ALIAKSANDR V. HOHA, ALIAKSANDR A. POZNYAK, SERGEY M. ZAVADSKI,  
DMITRIY A. GOLOSOV, ANDREI N. PLIGOVKA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 18 March 2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** Two-layer Al/Nb (1000/200 nm) was deposited by sputtering using a DC magnetron method on Si wafers. The anodizing was in 0.2 M oxalic solution at 53 V, re-anodized in the 0.5 M boric acid in potentiodynamic mode at increase of potential until 400 V. For forming anodic composite nanostructure, the porous anodic aluminum oxide was partially removed in 50 % aqueous solution of phosphoric acid at 50°C for 1200 s. The morphology, photoluminescence, and optical reflection of an anodic composite nanostructure were investigated. The anodic composite nanostructure showed effective optical reflection in the wavelength range from 540 to 1000 nm, and the maximum reflective efficiency was observed at a wavelength of 850 nm, 52 % reflectance occurs. The photoluminescence maximum was observed at a wavelength of 453 nm.

**Keywords:** high aspect ratio, reemission, nanostructuring, nanomaterial, niobium, niobium oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NbO<sub>2</sub>, bandgap.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The authors thank E.Chubenko from the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics for her help with photoluminescence investigations.

**For citation.** Hoha A.V, Poznyak A.A., Zavadski S.M., Golosov D.A., Pligovka A.N. Anodic Composite Nanostructure: Formation, Morphology, Optical and Photoluminescent Properties. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 40-47.

### Введение

Формирование и исследование анодных композиционных наноструктур (АКН) на основе двухслойных систем вентильных металлов открывают широкие перспективы для разработки наноструктурированных материалов с новыми уникальными свойствами [1]. Особенностью таких АКН является то, что составляющие их наноструктурированные оксиды могут обладать не только диэлектрическими, но и полупроводниковыми свойствами. Кроме того, они представляют собой системы с периодическим изменяющимся показателем преломления [2], благодаря чему перспективны для применения в нанооптике, нанофотонике, микро- и наноэлектронике. Примером таких оксидов могут служить ZnO [3], TiO<sub>2</sub> [4], WO<sub>3</sub> [5].

Среди полупроводниковых оксидов можно выделить оксид ниобия, который обладает электрохромными свойствами [6], чувствительностью к различным газам [7], а также находит применение в перовскитных солнечных элементах [8]. Основными преимуществами данного материала является его химическая инертность и термическая стабильность. Актуальным остается вопрос улучшения морфологических характеристик наноструктурированного оксида ниобия, например, повышение устойчивости столбиков оксида ниобия при их высоком аспектном отношении. Одним из решений данного вопроса может быть создание АКН на основе массива наностолбиков оксида ниобия и матрицы анодного оксида алюминия (АОА) путем комбинирования приемов анодного оксидирования и химического травления. Подобная методика, помимо улучшения морфологических свойств материала, может придать ему ранее неизученные или нехарактерные для чистого анодного оксида ниобия свойства, а также значительно повлиять на оптические характеристики. На основе аналогичного АКН уже созданы перспективные газочувствительные датчики [7, 9], а также существуют перспективы

изготовления полупроводниковых приборов [10]. Исследование оптических и морфологических свойств АКН оксида ниобия и оксида алюминия представляет особую важность, так как позволяет расширить диапазон возможностей приборного применения данного материала. Было установлено [11, 12], что наноструктурированный оксид ниобия в ряде случаев обладает фотолюминесцентными свойствами. В работе [11], посвященной исследованию наноиголок оксида ниобия, были получены значения длин волн, на которых наблюдался пик интенсивности излучения, равные 407 и 496 нм, с шириной запрещенной зоны (ШЗЗ) 3,15 эВ. В работе [12] установлено, что максимум излучения наноиголок оксида ниобия при температуре 9 К соответствовал 490 нм, а при повышении температуры до комнатной преобладающим стал пик на длине волны 456 нм при ШЗЗ 3,3 эВ. Однако в случае АКН на основе оксидов ниобия и алюминия вклад в фотолюминесценцию наноструктуры может вносить не только оксид ниобия, но и оксид алюминия. Исследована фотолюминесценция пористой матрицы АОА, сформированной в водном растворе ортофосфорной кислоты, максимум ее фотолюминесценции наблюдается на длине волны 415 нм [13]. Также показана фотолюминесценция для АОА, сформированного в водном растворе щавелевой кислоты. Максимум фотолюминесценции приходится на диапазон длин волн 470–480 нм [14]. Следовательно, общая фотолюминесценция АКН может быть обусловлена как сочетанием фотолюминесцентных свойств каждого из компонентов, входящих в АКН, так и представлена фотолюминесценцией одного из входящих в состав компонентов АКН. На основании вышесказанного исследование фотолюминесцентных свойств АКН на основе массива наностолбиков оксида ниобия и матрицы оксида алюминия, его оптических и морфологических особенностей является актуальной задачей.

В данной работе была сформирована АКН методом электрохимического анодирования и химического травления двухслойной системы Al/Nb, а также проведено исследование фотолюминесценции, оптического отражения и морфологии АКН.

### Методика проведения эксперимента

Для формирования АКН на кремниевые пластины методом магнетронного распыления наносили двухслойные системы Al/Nb с толщинами слоев алюминия и ниобия 1000 нм и 200 нм соответственно. Электрохимическое формирование АКН проводили в вертикальной политетрафторэтиленовой двухэлектродной электрохимической ячейке; данная ячейка обеспечивает анодирование двухслойной системы Al/Nb без доступа электролита к кремниевой подложке. Для проведения эксперимента использовали источник токов и напряжений KEYSIGHT N5752A и мультиметр KEYSIGHT 34470A. Электрохимическое анодирование верхнего слоя алюминия проводили в 0,2 М водном растворе щавелевой кислоты при постоянном напряжении 53 В со скоростью развертки напряжения 1 В/с. После завершения этапа анодирования алюминия производили замену электролита на 0,5 М водный раствор борной кислоты и затем реанодировали подслой ниобия до напряжения 400 В. Для создания АКН проводили удаление большей части АОА методом химического травления в течение 1200 с в 50 % растворе ортофосфорной кислоты при температуре 50 °С.

Морфология образцов с АКН была исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при помощи электронного микроскопа Hitachi S 4800. Исследование фотолюминесценции проводили на лазерном спектрометрическом комплексе на основе монохроматора SOLAR MS 7504i. Детектор представляет собой цифровую камеру Proscan HS 101H с кремниевой ПЗС матрицей. Источником света была ксеноновая лампа с максимальной мощностью 1 кВт. Монохроматические линии из спектра лампы выделяли при помощи двойного монохроматора SOLAR DM 160. Измерение спектра возбуждения фотолюминесценции и спектра фотолюминесценции проводили при температуре 20 °С. Фактическая мощность ксеноновой лампы составляла 450 Вт. Ширина входной щели монохроматора MS 7504i составляла 100 мкм при выдержке 20 с и температуре детектора 0 °С. Длина волны детектирования возбуждения фотолюминесценции составляла 450 нм при ширине спектральной полосы детектирования 0,49 нм. Измерение фотолюминесценции проводилось при длине волны возбуждения 340 нм. Оптические характеристики были измерены при помощи спектрофотометра MC 121. Сканирование поверхности экспериментального образца

осуществлялось в диапазоне длин волн от 190 до 1100 нм с шагом 2 нм, угол падения и регистрации составлял  $10^\circ$  по отношению к нормали к поверхности.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены СЭМ изображения поверхности и скола сформированных АКН на кремниевых пластинах. Из рис. 1, *a* видно, что на всей поверхности достаточно равномерно расположены столбики оксида ниобия, однако на поверхности присутствуют дефектные области, что предположительно может быть связано с дефектами исходных металлических пленок, полученных при магнетронном распылении.

Данные дефекты, по всей вероятности, могут оказывать определенное влияние на оптические и фотолюминесцентные характеристики АКН. При рассмотрении поверхности с большим увеличением (рис. 1, *b*) и поперченного скола заметно, что столбики окружает тонкий слой матрицы АОА, которая поддерживает их в вертикальном положении. На рис. 1, *c*, где представлено СЭМ изображение поперченного скола экспериментального образца, четко отображена композиция АКН, снизу вверх: кремниевая пластина – металлический ниобий – сплошной слой оксида ниобия – столбики оксида ниобия в поддерживающей тонкой матрице АОА. Высота столбиков составила 700 нм, а диаметр – около 70 нм, расстояние между центрами столбиков 125 нм, высота, на которую столбики выступают из АОА, составила 303 нм, толщина оставшегося слоя АОА составляет, таким образом, 205 нм.

Анализ СЭМ изображений позволяет сделать вывод о высокой степени упорядоченности и воспроизводимости формы и размеров наностолбиков оксида ниобия. Кроме того, на рис. 1, *c* хорошо заметно, что АОА четко выполняет свою функцию поддержания столбиков в вертикальном положении, и в случае его отсутствия наностолбики образовали бы пучки, опираясь друг на друга [10]. Также следует отметить, что подбор режимов травления позволил оптимизировать количество остаточного АОА в поддерживающем слое, с одной стороны, минимизировав его, что должно положительно сказаться на электрических и фотолюминесцентных характеристиках АКН. Помимо этого, минимизация АОА позволяет использовать большую часть всей удельной площади развитой поверхности оксида ниобия. В то же время оставшийся АОА продолжает успешно выполнять функцию механической стабилизации морфологии АКН.

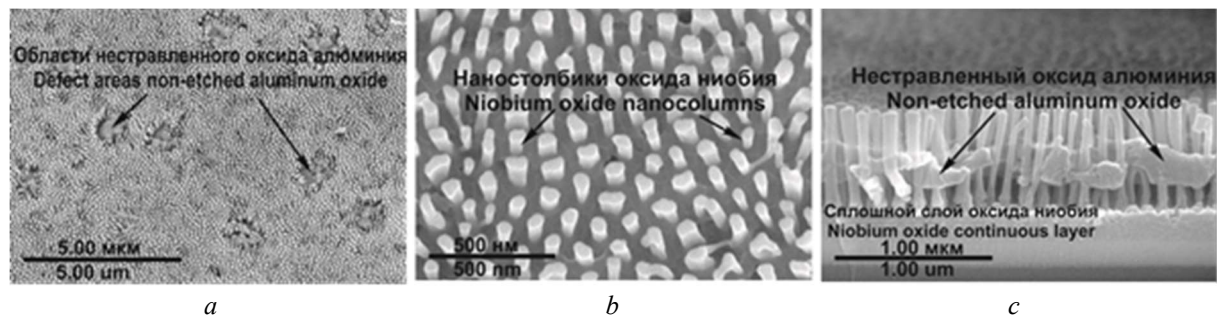


Рис. 1. Сканирующие электронные изображения поверхности (*a*, *b*) и скола (*c*) анодной композиционной наноструктуры

Fig. 1. Scanning electron images of surface (*a*, *b*) and cross-section (*c*) of anodic composite nanostructure

Спектры возбуждения (excitation) и излучения (emission) фотолюминесценции изображены на рис. 2, *a*. Возбуждение фотолюминесценции АКН начинается примерно при длине волны 320 нм с дальнейшим резким ростом интенсивности до 710 отн. ед. и последующим снижением до 350 отн. ед. Четкий пик возбуждения отмечается на длине волны 367 нм. Оценка и расчет энергии межзонных переходов АКН на основе спектра возбуждения фотолюминесценции осуществлялись по соотношению

$$E_{ph} = 1240 \cdot \lambda^{-1}, \quad (1)$$

где  $E_{ph}$  – энергия фотона, эВ,  $\lambda$  – длина световой волны, нм.

По результатам расчетов энергия поглощенных фотонов возбуждения фотолюминесценции АКН составила 3,38 эВ.

На рис. 2, *a* представлен спектр излучения фотолюминесценции АКН. Из рис. 2, *a* видно, что фотолюминесценция начинается при длине волны около 370 нм и высветчивается до 685 нм, после чего снижается до своего минимума на длине волны около 660 нм. Максимум излучения приходится на длину волны 453 нм, где энергия фотона в соответствии с соотношением (1) составляет 2,8 эВ. Однако проведенные исследования фотолюминесценции наностолбиков оксида ниобия, не модифицированных оксидом алюминия, сформированных по той же методике, с теми же морфологическими параметрами, что и наностолбики в АКН, не выявили фотолюминесцентных свойств анодного оксида ниобия. Это доказывает предположение о том, что фотолюминесценция АКН обусловлена присутствием анодного оксида алюминия в ее составе. Согласно проведенным ранее исследованиям, фотолюминесценция АОА с максимумом на длинах волн 470–480 нм, сформированного в водном растворе щавелевой кислоты, может быть обусловлена оксалат-анионами [14], однако, в данной работе пик фотолюминесценции АОА наблюдается на длине волны 470 нм. Сдвиг максимума фотолюминесценции в нашем случае может быть обусловлен другой концентрацией электролита, толщиной оксидного слоя, а также наноструктурированием. Представленный на рис. 2, *a* спектр излучения достаточно растянут с 375 до 670 нм, что предположительно можно обосновать неоднородным составом исследуемой АКН, состоящей из оксида алюминия и оксида ниобия, а также его субоксидов [15].

На рис. 2, *b* изображен спектр оптического отражения АКН. Оптическое поглощение присутствует в ультрафиолетовом диапазоне, так как энергия фотонов на этом промежутке соответствует ШЗЗ обоих компонентов композитного материала, и почти все оптическое излучение в этом диапазоне поглощается экспериментальным образцом.

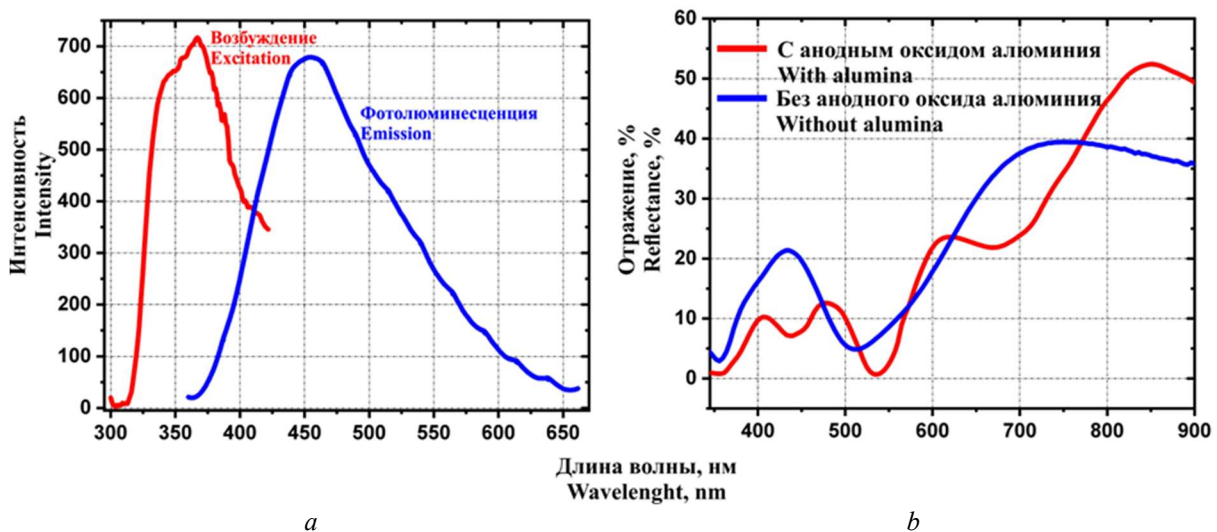


Рис. 2. Фотолюминесцентные (*a*) и оптические (*b*) характеристики анодной композиционной наноструктуры

Fig. 2. Photoluminescence (*a*) and optical (*b*) characteristics of anodic composite nanostructure

Следует отметить, что по причине использования в качестве подложки для АКН кремниевой пластины, исследовать спектральную зависимость пропускания АКН не представлялось возможным. Вероятно, что часть прошедшего оптического излучения через АКН была отражена кремниевой пластиной, но оценить этот вклад на данном этапе исследований не представляется возможным. На длине волны 370 нм оптическое отражение начинает плавно возрастать и с небольшим минимумом на длине волны 440 нм достигает своего пика на длине волны 480 нм, после чего резко уменьшается практически до нулевой отметки на 538 нм. Полное отсутствие отражения на данной длине волны может быть объяснено тем, что весь падающий свет рассеивается на развитой поверхности АКН и кремниевой пластине. После прохождения этого минимума отражение начинает резко возрастать с небольшим минимумом на длине волны 670 нм, предположительно из-за неоднородности поверхности

сильно растягивается в спектре и достигает своего пика на длине волны 850 нм – более половины оптического излучения на данной длине волны отражается. Видно, что отражательная способность образца, не модифицированного АОА, т. е. просто массив наностолбиков оксида ниобия, заметно отличается от модифицированного образца, в котором присутствует поддерживающий слой АОА. В данном случае максимум отражения смещен относительно максимума для АКН в более коротковолновую область и наблюдается на длине волны 744 нм, а отражение принимает меньшее значение и составляет 39,38 %. Также смещен и минимум отражения. В данном случае он наблюдается на длине волны 513 нм, составляет 4,84 %, т. е. в минимуме отражение несколько выше, чем для АКН.

В целом спектр отражения для данного образца имеет заметное сходство в поведении кривой при некотором смещении минимумов и максимумов, имея всего два выраженных пика, что нельзя сказать про спектр отражения для АКН, для которого, как уже было отмечено, характерны небольшие дополнительные минимумы. Такое различие можно объяснить более упорядоченной морфологией поверхности чистого массива наностолбиков оксида ниобия. Что касается АКН, случайное распределение остатков матрицы АОА в упорядоченном массиве наностолбиков оксида ниобия, создавая дополнительные центры рассеяния света в структуре нанокompозита, вызывает более хаотичный процесс распространения света в данном материале, что проявляется в появлении дополнительных экстремумов на кривой отражения АКН по сравнению с чистым массивом столбиков оксида ниобия, свободным от АОА. Другое возможное объяснение можно предложить исходя из того факта, что АКН представляет собой более сложную структуру с двумя слоями с периодически чередующимися показателями преломления (столбики оксида ниобия в поддерживающей их снизу тонкой матрице АОА и слой выступающих из него столбиков анодного оксида ниобия, находящихся в воздухе), а чистый массив столбиков – однослойную структуру с периодически изменяющимся показателем преломления. Взаимодействие света с более сложной структурой АКН приводит к усложнению результирующего спектра отражения в сравнении со спектром массива столбиков оксида ниобия с полностью удаленным АОА. Окончательное выяснение причин различий оптических свойств требует дополнительных исследований, но результаты позволяют управлять оптическими свойствами нанокompозитов на основе анодных оксидов вентильных металлов.

### Заключение

В заключение следует отметить, что сформированная анодная композиционная наноструктура показала эффективное оптическое отражение в диапазоне длин волн от 540 до 1000 нм, а максимальная отражающая эффективность наблюдается на длине волны 850 нм и составляет 52 %. Пик фотолюминесценции наблюдается на длине волны 453 нм. Фотолюминесценция может быть обусловлена оксалат-анионами в анодном оксиде алюминия, но лишь дальнейшие исследования помогут прояснить данный вопрос. Однако сочетание собственных люминесцентных свойств анодного оксида алюминия с фотонно-кристаллическими свойствами анодной композиционной наноструктуры на основе столбиков анодного оксида ниобия при дальнейшей оптимизации процесса формирования анодной композиционной наноструктуры позволит создать материал с многообещающими свойствами для использования в нанооптике, фотонике и микроэлектронике.

### Список литературы / References

1. Pligovka A., Hoha A., Turavets U., Poznyak A., Zakharau Y. Formation features, morphology and optical properties of nanostructures via anodizing Al/Nb on Si and glass. *Materials Today: Proceedings. Elsevier.* 2021;37:A8-A15.
2. Pligovka A., Poznyak A., Norek M. Optical Properties of Porous Alumina Assisted Niobia Nanostructured Films–Designing 2-D Photonic Crystals Based on Hexagonally Arranged Nanocolumns. *Micromachines. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.* 2021;12(6):589.
3. Zhang B.P., Binh N.T., Segawa Y. Optical properties of ZnO rods formed by metalorganic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters. American Institute of Physics AIP.* 2003;83(8):1635-1637.

4. Kim D., Ghicov A., Albu S.P., Schmuki P. Bamboo-Type TiO<sub>2</sub> Nanotubes: Improved Conversion Efficiency in Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of the American Chemical Society*. American Chemical Society. 2008;130(49):16454-16455.
5. Khatko V., Gorokh G., Mozalev A., Solovei D., Llobet E., Vilanova X., Correig X. Tungsten trioxide sensing layers on highly ordered nanoporous alumina template. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006;118(1-2):255-262.
6. Özer N., Chen D.G., Lampert C.M. Preparation and properties of spin-coated Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films by the sol-gel process for electrochromic applications. *Thin Solid Films*. Elsevier B.V. 1996;277(1-2):162-168.
7. Pytlíček Z., Bendova M., Prasek J., Mozalev A. On-chip sensor solution for hydrogen gas detection with the anodic niobium-oxide nanorod arrays. *Sensors and Actuators, B: Chemical*. Elsevier B.V. 2019;284:723-735.
8. Ling X., Yuan J., Liu D., Wang Y., Zhang Y., Chen S., Wu H., Jin F., Wu F., Shi G., Tang X., Zheng J., Liu S., Liu Z., Ma W. Room-Temperature Processed Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as the Electron-Transporting Layer for Efficient Planar Perovskite Solar Cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*. American Chemical Society. 2017;9(27):23181-23188.
9. Mozalev A., Bendova M., Vazquez R.M., Pytlíček Z., Llobet E., Hubalek J. Formation and gas-sensing properties of a porous-alumina-assisted 3-D niobium-oxide nanofilm. *Sensors and Actuators, B: Chemical*. Elsevier B.V. 2016;229:587-598.
10. Pligovka A., Lazavenka A., Gorokh G. Anodic Niobia Column-like 3-D Nanostructures for Semiconductor Devices. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2019;18:790-797.
11. Zhou Y., Qiu Z., Lü M., Zhang A., Ma Q. Preparation and spectroscopic properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanorods. *Journal of Luminescence*. 2008;128(8):1369-1372.
12. He J., Hu Y., Wang Z., Lu W., Yang S., Wu G., Wang Y., Wang S., Gu H., Wang J. Hydrothermal growth and optical properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanorod arrays. *Journal of Materials Chemistry C. Royal Society of Chemistry*. 2014;2(38):8185-8190.
13. Nourmohammadi A., Asadabadi S.J., Yousefi M.H., Ghasemzadeh M. Photoluminescence emission of nanoporous anodic aluminum oxide films prepared in phosphoric acid. *Nanoscale Research Letters*. 2012;7(1):1-7.
14. Mukhurov N.I., Zhvavyi S.P., Terekhov S.N., Panarin A.Yu., Kotova I.F., Pershukovich P.P., Khodasevich I.A., Gasenkova I.V., Orlovich V.A. Influence of electrolyte composition on photoluminescent properties of anodic aluminum oxide. *Journal of Applied Spectroscopy*. Springer. 2008;75(2):214-218.
15. Pligovka A., Yunin P., Hoha A., Korolyov S., Gorokh G., Skorokhodov E. Morphology and Structure of Defected Niobium Oxide Nonuniform Arrays Formed by Anodizing Bilayer Al/Nb Systems. *Technical Physics*. 2020;65(11):1771-1776.

### Вклад авторов

Гога А.В. выполнил исследование, был ответственным за программное обеспечение, визуализацию, подготовку черновика рукописи, поиск ресурсов, обработку данных.

Позняк А.А. выполнил исследование, подготовил черновик рукописи, утвердил рукопись, провел формальный анализ, был ответственным за поиск ресурсов, визуализацию, обработку данных.

Завадский С.М. выполнил исследование, был ответственным за поиск ресурсов.

Голосов Д.А. утвердил рукопись, провел формальный анализ.

Плиговка А.Н. выполнил исследование, был ответственным за концептуализацию, администрирование и управление проектом, подготовку, обзор и редактирование рукописи, финансирование.

### Authors contribution

Hoha A.V. performed the research, was responsible for the software, visualization, preparation of a draft manuscript, search for resources, data processing.

Poznyak A.A. performed the research, prepared a draft of the manuscript, approved the manuscript, conducted a formal analysis, was responsible for finding resources, visualization, data processing.

Zavadski S.M. performed research, was responsible for finding resources.

Golosov D.A. approved the manuscript, conducted a formal analysis.

Pligovka A.N. performed research, was responsible for conceptualization, administration and project management, preparation, review and editing of the manuscript, funding.



### Сведения об авторах

**Гога А.В.**, стажер, младший научный сотрудник НИЧ НИЛ 4.10 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Позняк А.А.**, к.ф.-м.н, доцент, старший научный сотрудник НИЧ НИЛ 4.10, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Завадский С.М.**, к.т.н, доцент, начальник НИЧ Центра 9.1 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Голосов Д.А.**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЧ Центра 9.1 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

**Плиговка А.Н.**, к.т.н., старший научный сотрудник НИЧ НИЛ 4.10 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
тел. +375-29-118-97-68;  
e-mail: sash4ka06@yandex.ru  
Гога Александр Владимирович

### Information about the authors

**Hoha A.V.**, Junior Researcher at the R&D Laboratory 4.10 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Poznyak A.A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Senior Researcher at the R&D Laboratory 4.10, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Zavadski S.M.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Golosov D.A.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher at the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Pligovka A.N.**, Cand. of Sci., Senior Researcher at the R&D Laboratory 4.10 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka St., 6,  
Belarusian State University of Informatics  
and Radioelectronics  
tel. +375-29-118-97-68  
e-mail: sash4ka06@yandex.ru  
Hoha Aliaksandr Vladimirovich