

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Физика. Астрономия сериясы, 2021, том 135, №2, 43-48 беттер
<http://bulphysast.enu.kz>, E-mail: vest_phys@enu.kz

ҒТАХР: 29.19.22

М.Ф. Қадір¹, Н.Б. Нұрман¹, Б.Е. Алпысбаева¹, В.Ю. Смирнов²

¹ *Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

² *Юлих зерттеу орталығы, Юлих, Германия*

(E-mail: ¹ meruyert.kadir@mail.ru, ¹ nurgul.096@mail.ru, ¹ balausa.alpysbayeva@kaznu.kz,
² v.smirnov@fz-juelich.de)

Нанокеуекті алюминий оксиді негізіндегі наноталшықтардың супергидрофильді қасиеттері

Аннотация: берілген зерттеу жұмысында бір сатылы электрохимиялық анодтау әдісі арқылы қымыздыққышқыл электролитінде алынған супергидрофильді қасиетке ие, нанокеуекті алюминий оксидіне қарағанда құрылымы өзгеше болатын алюминий оксиді негізіндегі наноталшықтардың құрылымдық қасиеттері қарастырылған. Алынған наноталшықтардың супергидрофильді қасиеттері «Ossila» байланыс бұрышы гониометрі көмегімен анықталды. Анодтау процесінің жүру ұзақтығы анодты оксидтің наноқұрылымына ғана емес, гидрофильді қасиетке де әсер ететіні анықталды. Зерттеу жұмыстары көрсеткендей анодтау процесінің 60 секунд уақыт көрсеткішінде түзілген наноталшықтардың байланыс бұрышы 10 секундта $4,37^\circ$ мәнге дейін төмендеп, супергидрофильді қасиет көрсететіні белгілі болды.

Түйін сөздер: наноталшықтар, супергидрофильді қасиет, электрохимиялық анодтау әдісі, нанокеуекті алюминий оксиді, қымыздық қышқыл, байланыс бұрышы.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-135-2-43-48>

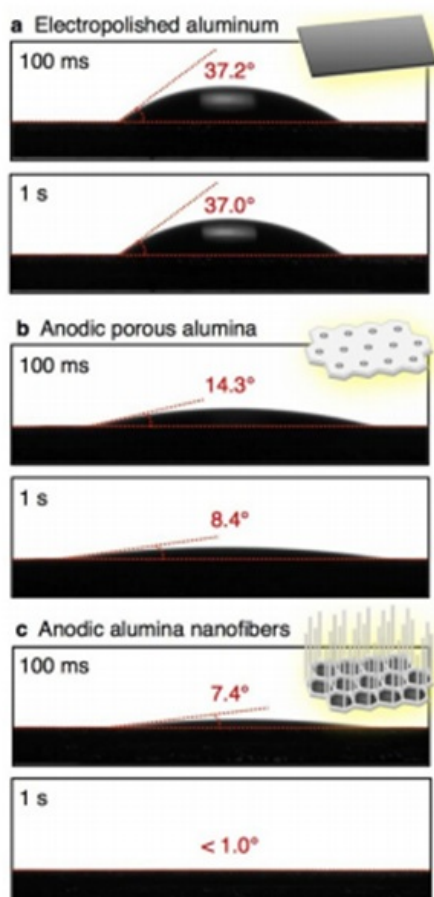
Түсті: 16.04.2021 /Жарияланымға рұқсат етілді: 15.05.2021

Кіріспе. Соңғы онжылдықта супергидрофильді беттердің қолданылуы аймағының кеңеюі, соның ішінде беттік булануға, сұйықтардың микротамшыларын анықтауға, өздігінен тазартылатын беттерде қолданылу зерттеушілердің назарын аударуда [1-3]. Көптеген зерттеушілер электролит, уақыт және кернеу сияқты анодтау параметрлерін өзгерту арқылы беттің морфологиясын оңай басқара отырып, анодты алюминий оксидінің ылғалдану қасиетін зерттеуге тырысты [4 - 6].

Алюминий беттерінің ылғалдануын бақылау коррозиядан қорғауға, жылу алмастырғыш құрылғыларда және мұздануға қарсы беттерден қорғаудың маңызды стратегиялық сипатына айналды [7-16]. Мысалы, сумен жанасу бұрышы 10° -дан аспайтын супергидрофильді алюминий беті су тамшысының тез таралуын көрсетеді, ал мұндай алюминий төсеніші потенциалды жоғары сапалы жылу алмастырғыштар мен ластануға қарсы материалдар ретінде қолданылуы мүмкін. Керісінше сумен жанасу бұрышы $= 150^\circ$ -дан үлкен супергидрофобты алюминий беттері судың сырғанауының керемет әрекетін көрсетеді және коррозияға төзімділігі жоғары материалдар мен беттерді тазартуға мүмкіндігі бар. Сондықтан супергидрофильді және супергидрофобты алюминий беттерін алу үшін көптеген беттік қатау, соның ішінде бояу [17], плазмалық өңдеу [18], коллоидты жабын, көміртекті нанобөлшектерді тұндыру [19] тәрізді көптеген процестер кеңінен зерттелуде.

Анодты алюминий наноталшықтарымен қапталған алюминий үлгісінің супергидрофильділігі [20] жұмыста дақарастырылған болатын (сурет 1). Бұл жұмыста авторлар электрлік жылтыратылған алюминийдің (сурет 1а), күкірт қышқылымен анодтау нәтижесінде пайда болған анодты кеуекті алюминий оксидінің (б) және (с) пирофосфор қышқылымен анодтау нәтижесінде түзілген анодты алюминий оксидінің наноталшықтарының 2 мкл су мөлшерімен судың жанасу бұрышын зерттеген. Су тамшысы құлағаннан кейін электр жылтыратылған беттегі 100 мс ішінде жанасу бұрышы $37,2^\circ$ құрайтынын, ал 1

секундтан кейін жанасу бұрышы өзгермегенін байқауға болады. Кеуекті алюминий оксидінің жанасу бұрышы 100 мс үшін $14,3^\circ$ құрады және 1 с ішінде $8,4^\circ$ дейін төмендегенімен су тамшысы әлі де кеуекті алюминий оксидінде қалды. Наноталшықпен қапталған бетте нөлге жақын шектік жанасу бұрышы 1 с ішінде анық байқалды. Пирофосфор қышқылында анодтау нәтижесінде пайда болған анодты алюминий оксидінің наноталшықтары жанасу бұрышы $1,0^\circ$ аз болатын супергидрофильді қасиет береді. Мұндай супергидрофильділік ұзақ мерзімді анодтауға ұшыраған бетте де пайда болды.



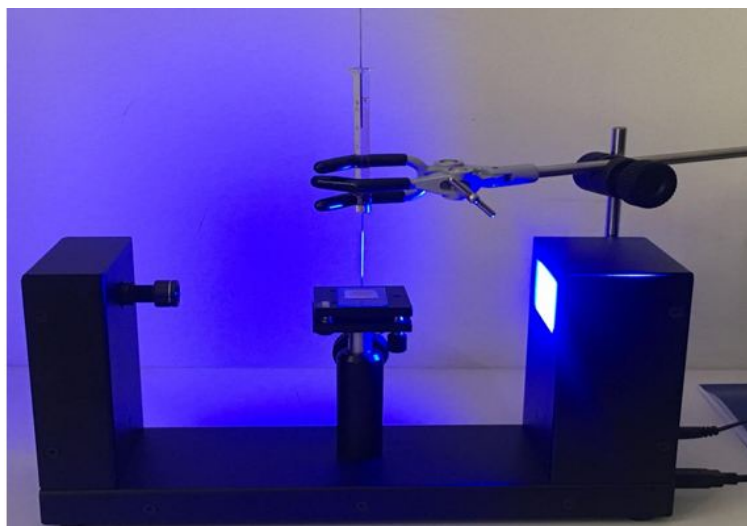
СУРЕТ 1 – Анодты алюминий наноталшықтарымен қапталған алюминий үлгісінің супергидрофильділігі [20]

Әр түрлі алюминий оксидінің наноталшықтарымен қапталған бұл жаңа алюминий беті әртүрлі беттік зерттеулер мен инженерлік зерттеулерге үлкен қызығушылық тудыратындықтан, алюминий бетінің супергидрофильді әрекеті әрі қарай зерттеуді қажет етеді.

Алынған нәтижелер және талқылаулар. Бұл зерттеу жұмысында алюминий оксиді негізіндегі наноталшықтар $(\text{COOH})_2$ электролитінде бір сатылы электрохимиялық анодтау процесі арқылы синтезделді. Анодтау процесі $U = 120 \text{ В}$, $T = 21^\circ \text{ C}$, $t = 60 \text{ с}$ шарттарында жүргізілді. Бастапқы материал ретінде тазалығы 99,99%, қалыңдығы 50 микрон болатын алюминий фольгасы қолданылды.

Қымыздық қышқыл электролитінде алынған нанокеуекті алюминий оксиді наноталшықтарының гидрофильдік қасиеттері «Ossila» байланыс бұрышы гониометрімен зерттелді. Ол бетпен жанасу бұрышын немесе тамшылардың беттік керілуін өлшеудің жылдам, сенімді және қарапайым әдісін ұсынады. «Ossila» байланыс бұрышы гониометрі бейнесі 2 суретте көрсетілген. Жүйе жанасу бұрышын өлшеу үшін қарапайым және интуитивті интерфейсін қамтамасыз ететін компьютерлік бағдарламалық жасақтамамен толықтырылған.

Кернеудің 120 В мәнінде электрохимиялық анодталған үлгілер арнайы дистилденген сумен жуылып, жанасу бұрышын зерттеу алдында қажетті түрде тазаланды. Зерттелініп отырған үлгілер көлденең түрде орналастырылып, тегіс болу мақсатында шыныға біркелкі бекітілді. Келесі кезеңде шприц дистилденген сумен толтырылып, инені үлгі бетіне қатысты туралау қажет. Дистилденген су инеден шыққаннан кейін тамшы пайда болады. Тамшының диаметрі иненің диаметрінен 3-4 есе артық. Сұйықтықты инеден бүтін тамшы шыққанша беру керек.



Сурет 2 – «Ossila» байланыс бұрышы гониометрінің бейнесі

Тамшының тұрақтануын 1-3 минут күткеннен кейін, содан кейін статикалық жанасу бұрышын өлшеуге болады. Инені тамшыға қарай жылжытып сұйықтық бетте толықтай тарағанша қосып отыру керек. Содан кейін ине алынып тасталады және бастапқы жанасу бұрышы өлшенді. Бұл процесс 3-5 рет қайталанады, содан кейін орташа мәні алынды. «Ossila» байланыс бұрышы гониометрінің диапазоны 180° дейін, ал максималды өлшеу жылдамдығы 33 мс. 1-кестеде «Ossila» байланыс бұрышы гониометрінің физикалық сипаттамалары келтірілген.

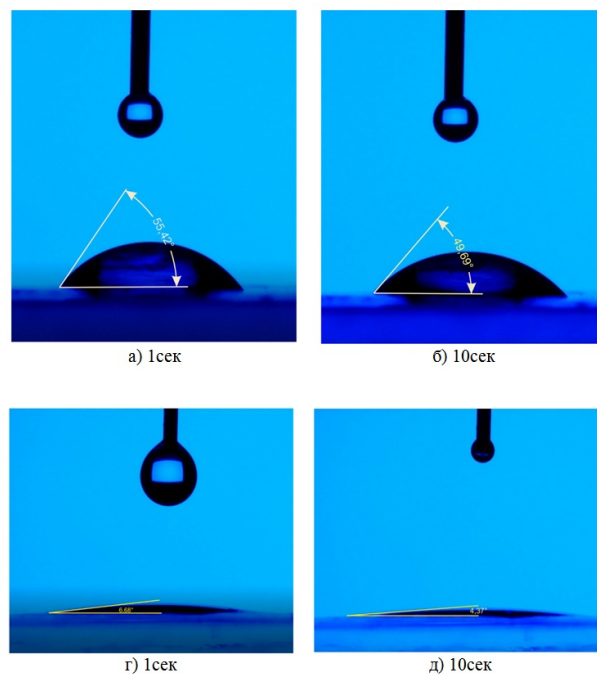
Кесте 1 – Жанасу бұрышы гониометрінің физикалық сипаттамалары

Кезең өлшемдері	50мм x 50мм
Максималды тамшы ені	20 мм
Үлгінің максималды қалыңдығы	20 мм
Камераның максималды ажыратымдылығы	1920 x 1080 пиксел

3 – суретте тәжірибелік жұмыстардың нәтижесінде қымыздық қышқыл электролитінде 15 - 60 секунд уақыт аралығында 120 В кернеуде алынған үлгілер үшін уақыт өзгерісіне байланысты сумен жанасу бұрышының бейнесі көрсетілген. Жоғары кернеу көзі берілсе де анодтау процесінің 15секунд жүруіне байланысты онда наноталшықтар түзіліп үлгермеді (сурет 3 а, б - нанокеукті алюминий оксиді). Нанокеукті алюминий оксиді бар бетке су тамшылары құлағаннан кейін 1 секундта байланыс бұрышы $55,42^\circ$ көрсетті. Бірнеше секундтардан кейін су тамшыларының үлгі бетінде жайылуы айтарлықтай байқалмады және бұрыш мәні $49,69^\circ$ дейін төмендеді. Ал анодтау процесінің 60 секунд уақыт көрсеткішінде түзілген наноталшықтардың (сурет 3 г, д) байланыс бұрышыалғашқы 1 секундта $6,68^\circ$ және 10 секундта $4,37^\circ$ мәнге дейін төмендеп, супергидрофильді қасиет көрсетті. Екі үлгідегі су тамшысының көлемі 9 мкл.

Үлгілердің сумен жанасу бұрышын өлшеу барысында анодтау процесінің жүру ұзақтығы анодты оксидтің наноқұрылымына ғана емес, гидрофильді қасиетке де әсер ететіні

анықталды. Супергидрофильді қасиетке қол жеткізу үшін анодты оксидті алюминийдің бетіне наноталшықтар қалыптастыру қажет екенін көрсетті. Мұндай наноталшықтар бір сатылы электрохимиялық анодтау процесі арқылы аз уақытта синтезделді.



Сурет 3 – Уақыт өзгерісіне байланысты үлгілердің сумен жанасу бұрышының бейнесі: а, б – нанокеукеті алюминий оксиді; г, д – нанокеукеті алюминий оксиді негізіндегі наноталшықтар

Қорытынды. Берілген зерттеу жұмысының нәтижелері бойынша синтезделген нанокеукеті алюминий оксиді негізіндегі наноталшықтардың супергидрофильді қасиеттерінің байқалатыны анықталды. Наноталшықтарды алу параметрлеріне байланысты гидрофильді қасиеттерінің де өзгеріске ұшырайтыны белгілі болды. Бір сатылы анодтау процесі бойынша алынған нанокеукеті алюминий оксиді наноталшықтары негізінде әртүрлі материалдардың бетіне орналастыруға болатынын атап кету керек, сонымен қатар, үлгілердің өзін фильтр ретінде қолдануға болатыны берілген материалдың ерекшелігі мен бұл зерттеу аймағының өзектілігі айқын екені анықталуда.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Zhang L., Zhao N., Xu J. Fabrication and application of superhydrophilic surface: a review // *J. Adhes. Sci Technol.* – 2014. – Т. 28. – P. 769-790.
- 2 Howarter J.A., Youngblood J.P. Self-Cleaning and Next Generation Anti-Fog Surfaces and Coatings // *Macromol. Rapid Comm.* – 2008. – Т. 29. – P. 455-466.
- 3 Ma P., Wang Y., Feng K., Chen Z.J., Wu W.G. Hierarchical superhydrophobic / hydrophilic substrates based on nanospheres self-assembly on micro-pillars // *Mater. Res. Express.* – 2014. – Т. 1. – P. 1-14.
- 4 Redon R., Vazquez-Olmoset A., Mata-Zamora M.E., Ordonez-Medrano A., Rivera-Torres F. and Saniger J.M. Contact angle studies on anodic porous alumina // *J. Colloid Interf. Sci.* – 2005. – Т. 287. – P. 664-670.
- 5 Leese H., Bhurtun V., Lee K.P. and Mattia D. Wetting behaviour of hydrophilic and hydrophobic nanostructured porous anodic alumina // *Colloid. Surface. A.* – 2013. – Т. 420. – P. 53-8.
- 6 Mateo J.N., Kulkarni S.S., Das L., Bandyopadhyay S., Tepper G.C., Wynne K.J. and Bandyopadhyay S. Wetting behavior of polymer coated nanoporous anodic alumina films: transition from super-hydrophilicity to super-hydrophobicity // *Nanotechnology.* – 2011. – Т. 22. – P. 1-10.
- 7 Lee W., Park S.J. Porous anodic aluminum oxide: anodization and templated synthesis of functional nanostructures // *Chem. Rev.* – 2014. – Т. 114. – P. 7487-7556.
- 8 Kondo T., Miyazaki H., Nishio K., Masuda H. Surface-enhanced Raman scattering on multilayered nanodot arrays obtained using anodic porous alumina mask // *J. Photochem. Photobiol. A.* – 2011. – Т. 221. – P. 199-203.

- 9 Yanagishita T., Nishio K., Masuda H. Antireflection polymer hole array structures by imprinting using metal molds from anodic porous alumina // *Appl. Phys. Express.* – 2008. – Т. 1. – P. 1-3.
- 10 Kondo T., Tanji M., Nishio K., Masuda H. Cross-striped ordered arrays of Au nanoparticles in anodic porous alumina matrix // *Electrochem. Solid-State Lett.* – 2006. – Т. 9. – P. 189-191.
- 11 Lee W., Schwirn K., Steinhart M., Pippel E., Scholz R., Gosele U. Structural engineering of nanoporous anodic aluminium oxide by pulse anodization of aluminium // *Nat. Nanotechnol.* – 2008. – Т. 3. – P. 234-239.
- 12 Sulka G.D. Highly ordered anodic porous alumina formation by self-organized anodizing, in: A. Eftekhari (Ed.) // *Nanostructured Materials in Electrochemistry*, Wiley-VCH. – 2008. – P. 1-116.
- 13 Kikuchi T., Yamamoto T., Suzuki R.O. Growth behavior of anodic porous alumina formed in malic acid solution // *Appl. Surf. Sci.* – 2013. – Т. 284. – P. 907-913.
- 14 Kikuchi T., Nishinaga O., Natsui S., Suzuki R.O. Fabrication of anodic porous alumina via acetylenedicarboxylic acid anodizing // *ECS Electrochem. Lett.* – 2014. – Т. 3. – P. 25-28.
- 15 Kikuchi T., Yamamoto T., Natsui S., Suzuki R.O. Fabrication of anodic porous alumina by squaric acid anodizing // *Electrochim. Acta.* – 2014. – Т. 123. – P. 14-22.
- 16 Pashchanka M., Schneider J.J. Experimental validation of the novel theory explaining self-organization in porous anodic alumina films // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2013. – Т. 15. – P. 7070-7074.
- 17 Tsuchiya H., Berger S., Macak J.M., Munoz A.G., Schmuki P. A new route for the formation of self-organized anodic porous alumina in neutral electrolytes // *Electrochem. Commun.* – 2007. – Т. 9. – P. 545-550.
- 18 Takenaga A., Kikuchi T., Natsui S., Suzuki R.O. Self-ordered aluminum anodizing in phosphonoacetic acid and its structural coloration // *ECS Solid State Letters.* – 2015. – Т. 4. – P. 55-58.
- 19 Asoh H., Nishio K., Nakao M., Yokoo A., Tamamura T., Masuda H. Fabrication of ideally ordered anodic porous alumina with 63 nm hole periodicity using sulfuric acid // *J. Vac. Sci. Technol.* – 2001. – Т. 19. – P. 569-572.
- 20 Kikuchi T., Nishinaga O., Nakajima D., Kawashima J., Natsui S., Sakaguchi N., Suzuki R.O. Ultra-High Density Single Nanometer-Scale Anodic Alumina Nanofibers Fabricated by Pyrophosphoric Acid Anodizing // *Scientific Reports.* – 2014. – Т. 4. – P. 1 - 6.

М.Ф. Қадір¹, Н.Б. Нұрман¹, Б.Е. Алпысбаева¹, В.Ю. Смирнов²

¹ *Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

² *Исследовательский центр Юлих, Юлих, Германия*

Супергидрофильные свойства нановолокон на основе оксида алюминия

Аннотация. В данной исследовательской работе рассмотрены структурные свойства нановолокон на основе оксида алюминия, обладающих супергидрофильными свойствами, полученными в щавелевой кислоте методом одностадийного электрохимического анодирования, структура которых отличается от структуры нанопористого оксида алюминия. Супергидрофильные свойства полученных нановолокон определяли с помощью гониометра угла контакта "Ossila". Установлено, что длительность процесса анодирования влияет не только на наноструктуру анодного оксида, но и на гидрофильные свойства. Исследования показали, что угол контакта нановолокон, образующихся при показателе времени 60 секунд процесса анодирования, снижается до значения 4,37° за 10 секунд и проявляет супергидрофильное свойство.

Ключевые слова: нановолокна, супергидрофильные свойства, электрохимическое анодирование, нанопористый оксид алюминия, щавелевая кислота, краевой угол.

M.F. Kadir¹, N.B. Nurman¹, B.E. Alpysbayeva¹, V.Y. Smirnov²

¹ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

² *Forschungszentrum Julich (FZJ), Julich, Germany*

Superhydrophilic properties of aluminum oxide nanofibers

Abstract. The article considers structural properties of aluminum oxide nanofibers with superhydrophilic properties obtained in oxalic acid by single-stage electrochemical anodizing, whose structure differs from that of nanoporous aluminum oxide. The superhydrophilic properties of the obtained nanofibres were determined using an Ossila contact angle goniometer. It has been found that the duration of the anodisation process affects not only the nanostructure of the anodic oxide, but also the hydrophilic properties. The studies have shown that the contact angle of the nanofibres formed at 60 seconds of anodisation process decreases to 4.37° for 10 seconds and exhibits a superhydrophilic property

Keywords: nanofibers, superhydrophilic properties, electrochemical anodizing, nanoporous aluminum oxide, oxalic acid, contact angle.

References

- 1 Zhang L., Zhao N., Xu J. Fabrication and application of superhydrophilic surface: a review, *J. Adhes. Sci Technol.*, 28, 769-790 (2014).
- 2 Howarter J.A. and Youngblood J.P. Self-Cleaning and Next Generation Anti-Fog Surfaces and Coatings, *Macromol. Rapid Comm.*, 29, 455-466 (2008).
- 3 Ma P., Wang Y., Feng K., Chen Z.J. and Wu W.G. Hierarchical superhydrophobic / hydrophilic substrates based on nanospheres self-assembly on micro-pillars, *Mater. Res. Express*, 1045010 (2014).

- 4 Redon R., Vazquez-Olmoset A., Mata-Zamora M.E., Ordenez-Medrano A., Rivera-Torres F. and Saniger J.M. Contact angle studies on anodic porous alumina' J. Colloid Interf. Sci., 287, 664-670 (2005).
- 5 Leese H., Bhurtun V., Lee K.P. and Mattia D. Wetting behaviour of hydrophilic and hydrophobic nanostructured porous anodic alumina, Colloid. Surface. A., 420, 53-8 (2013).
- 6 Mateo J. N., Kulkarni S. S., Das L., Bandyopadhyay S., Tepper G. C., Wynne K. J. and Bandyopadhyay S. Wetting behavior of polymer coated nanoporous anodic alumina films: transition from super-hydrophilicity to super-hydrophobicity, Nanotechnology, 22, 035703 (2011).
- 7 Lee W., Park S.-J. Porous anodic aluminum oxide: anodization and templated synthesis of functional nanostructures, Chem. Rev., 114, 7487-7556 (2014).
- 8 Kondo T., Miyazaki H., Nishio K., Masuda H. Surface-enhanced Raman scattering on multilayered nanodot arrays obtained using anodic porous alumina mask, J. Photochem. Photobiol. A, 221, 199-203 (2011).
- 9 Yanagishita T., Nishio K., Masuda H. Antireflection polymer hole array structures by imprinting using metal molds from anodic porous alumina, Appl. Phys. Express, 1, 067004 (2008).
- 10 Kondo T., Tanji M., Nishio K., Masuda H. Cross-striped ordered arrays of Au nanoparticles in anodic porous alumina matrix, Electrochem. Solid-State Lett., 9, 189-191 (2006).
- 11 Lee W., Schwirn K., Steinhart M., Pippel E., Scholz R., Gosele U. Structural engineering of nanoporous anodic aluminium oxide by pulse anodization of aluminium, Nat. Nanotechnol., 3, 234-239 (2008).
- 12 Sulka G.D. Highly ordered anodic porous alumina formation by self-organized anodizing, in: A. Eftekhari (Ed.), Nanostructured Materials in Electrochemistry, Wiley-VCH, 1-116 (2008).
- 13 Kikuchi T., Yamamoto T., Suzuki R.O. Growth behavior of anodic porous alumina formed in malic acid solution, Appl. Surf. Sci., 284, 907-913 (2013).
- 14 Kikuchi T., Nishinaga O., Natsui S., Suzuki R.O. Fabrication of anodic porous alumina via acetylenedicarboxylic acid anodizing, ECS Electrochem. Lett., 3, C25-C28 (2014).
- 15 Kikuchi T., Yamamoto T., Natsui S., Suzuki R.O. Fabrication of anodic porous alumina by squaric acid anodizing, Electrochim. Acta, 123, 14-22 (2014).
- 16 Pashchanka M., Schneider J.J. Experimental validation of the novel theory explaining self-organization in porous anodic alumina films, Phys. Chem. Chem. Phys., 15, 7070-7074 (2013).
- 17 Tsuchiya H., Berger S., Macak J.M., Munoz A.G., Schmuki P. A new route for the formation of self-organized anodic porous alumina in neutral electrolytes, Electrochem. Commun., 9, 545-550 (2007).
- 18 Takenaga A., Kikuchi T., Natsui S., Suzuki R.O. Self-ordered aluminum anodizing in phosphonoacetic acid and its structural coloration, ECS Solid State Letters, 4, P55-P58 (2015).
- 19 Asoh H., Nishio K., Nakao M., Yokoo A., Tamamura T., Masuda H. Fabrication of ideally ordered anodic porous alumina with 63 nm hole periodicity using sulfuric acid, J. Vac. Sci. Technol., B 19, 569-572 (2001).
- 20 Kikuchi T., Nishinaga O., Nakajima D., Kawashima J., Natsui S., Sakaguchi N., Suzuki R.O. Ultra-High Density Single Nanometer-Scale Anodic Alumina Nanofibers Fabricated by Pyrophosphoric Acid Anodizing, Scientific Reports, 4, 1 - 6 (2014).

Авторлар туралы мәлімет:

Қадір М.Ф. - негізгі автор, Плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының 2 курс докторанты, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан.

Нұрман Н.Б. - Плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының 2 курс магистранты, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан.

Алпысбаева Б.Е. - Плазма физикасы, нанотехнология және компьютерлік физика кафедрасының аға оқытушысы, PhD, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан.

Смирнов В.Ю. - Юлих зерттеу орталығының ғылыми қызметкері, PhD, Юлих, Германия.

Кадір М.Ф. - **The main author**, Ph.D. student of the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

Nurman N.B. - undergraduate of the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

Alpysbayeva B.E. - Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Plasma Physics, Nanotechnology and Computer Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

Smirnov V.Y. - Forschungszentrum Julich (FZJ), Senior researcher, Ph.D., Julich, Germany.