

УДК 533.9.01  
EDN: FIWPBD

PACS: 52.25.-b



## Применение фторидной плазмы для формирования наноразмерных структур на поверхности кремния

В. С. Климин, И. О. Кесслер, Ю. В. Морозова, А. В. Саенко,  
З. Е. Вакулов, О. А. Агеев

*Изучается влияние длительности плазмохимической обработки кремниевых подложек во фторидной плазме. В качестве источника использовалась плазма гексафторида серы ( $SF_6$ ). Был проведён анализ полученных зависимостей шероховатости, высоты и угла наклона, сформированных при травлении, от времени плазмохимической обработки и от потока фторсодержащего газа. Длительность обработки во фторсодержащей плазме влияет на шероховатость вытравленной поверхности и геометрию вытравленной области, так при более длительной обработке во фторидной плазме возрастает шероховатость и угол полученной структуры. Изучение морфологии проводилось на установке атомно-силовой микроскопии (АСМ). Было установлено, что по мере увеличения времени плазмохимической обработки увеличивался угол вытравленной структуры, зависимость шероховатости от времени имела условно два участка, интенсивно возрастающей до 60 сек и участок с мало меняющейся шероховатостью, но с большой дисперсией. При увеличении потока фторсодержащего газа линейно увеличивались угол вытравленной структуры, высота структуры и шероховатость вытравленной поверхности.*

*Ключевые слова:* плазмохимическое травление, фторидная плазма, профилирование наноструктур, время травления, шероховатость.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-23-28

### Введение

На данном этапе развития микро- и наноэлектроники плазмохимическое травление (ПХТ) является одним из ключевых и перспективных направлений в области обработки кремниевых микро- и наноструктур. Плазмохимическое травление обладает рядом достоинств, в том числе и безмасочным способом формирования рельефа. Это позволяет

создавать структуры субмикронных масштабов, не прибегая к фотолитографии.

Для достижения необходимой конфигурации пластины требуется регулировка параметров плазмы [1–3]. Двумя основными характеристиками плазмы при выбранном режиме травления являются поток газа травителя и время плазмохимической обработки, в течение которого формируются структуры. Корректировка данных значений позволяет

Климин Виктор Сергеевич<sup>1</sup>, к.т.н., доцент.

E-mail: kliminvs@sfnu.ru

Кесслер Илария Олеговна<sup>1</sup>, студент.

Морозова Юлия Викторовна<sup>1</sup>, студент.

Саенко Александр Викторович<sup>1</sup>, к.т.н., доцент.

E-mail: avsaenko@sfnu.ru

Вакулов Захар Евгеньевич<sup>2</sup>, н.с., к.т.н.

E-mail: zakhar.vakulov@gmail.com

Агеев Олег Алексеевич<sup>1</sup>, д.т.н., профессор.

E-mail: ageevoa@sfnu.ru

<sup>1</sup> Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета.

Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук.

Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

Статья поступила в редакцию 12 сентября 2022 г.

© Климин В. С., Кесслер И. О., Морозова Ю. В., Саенко А. В., Вакулов З. Е., Агеев О. А., 2022

добиться желаемой шероховатости и угла наклона вытравленной структуры. В таком случае становится актуальным исследование зависимостей геометрических параметров полупроводниковых пластин от потока газа, при котором происходит плазмохимическое травление, и от времени плазмохимической обработки [4–10].

Целью данной работы является изучение режимов наноразмерного профилирования поверхности кремниевых подложек плазмохимическим травлением во фторидной плазме при изменении потока фторсодержащего газа и времени плазмохимической обработки.

### Методика эксперимента

В качестве образцов в экспериментальных исследованиях были использованы пластины *n*-Si (100), удельное сопротивление которых составило 0,001–0,005 Ом·см. Пластины химически очищались течение 10 мин в ацетоне и изопропиловом спирте при температуре 70 °С и выдерживались в водном растворе плавиковой кислоты (HF 10 %) в течение 30 сек, где впоследствии на поверхности подложек методом фотолитографии локально наносилась фоторезистивная плёнка из плазмотстойкого фоторезиста SPR-220 [10–15].

Плазмохимическое травление проводилось на установке STE ICPe 68 (ЗАО «НТО», г. Санкт-Петербург), позволяющей проводить обработку в комбинированном разряде емкостной и индуктивно-связанной плазмы, исследование морфологии полученных структур проводилось методом атомно-силовой микро-

скопии (АСМ) на зондовой нанолaborатории NtegraVita (ЗАО «НТ-МДТ», Россия).

Плазмохимическая обработка поверхности проводилась во фторидной плазме, формируемой разложением гексафторида серы (SF<sub>6</sub>), так как основными активными частицами при травлении кремния являются атомы фтора, а реактивное ионное травление осуществляется радикалами SF<sub>5</sub> [16–20].

Плазмохимическая обработка на первом этапе проводилась при следующих значениях: поток фторсодержащего газа  $N_{\text{SF}_6}$  – 10 см<sup>3</sup>/мин, время обработки  $t$  – 15–180 сек, мощность источника индуктивно-связанной плазмы  $W_{\text{ИСП}}$  – 300 В, мощность источника емкостной плазмы  $W_{\text{ЕСП}}$  – 35 Вт, напряжение смещения  $U_{\text{bias}}$  – 15 В, поток инертного газа аргона  $N_{\text{Ar}}$  – 60 см<sup>3</sup>/мин, температура процесса  $T$  – 21–87 °С, давление в реакторе  $P$  – 10 Па.

Плазмохимическая обработка на втором этапе проводилась при следующих значениях: поток фторсодержащего газа  $N_{\text{SF}_6}$  – 2–10 см<sup>3</sup>/мин, время обработки  $t$  – 30 сек, мощность источника индуктивно-связанной плазмы  $W_{\text{ИСП}}$  – 300 В, мощность источника емкостной плазмы  $W_{\text{ЕСП}}$  – 35 Вт, напряжение смещения  $U_{\text{bias}}$  – 15 В, поток инертного газа аргона  $N_{\text{Ar}}$  – 60 см<sup>3</sup>/мин, температура процесса  $T$  – 25 °С, давление в реакторе  $P$  – 10 Па.

### Результаты экспериментов

На рис. 1 показано АСМ-изображение пластины кремния из экспериментальной группы (ступенька на рис. 1а, профиль протравленной структуры на рис. 1б).

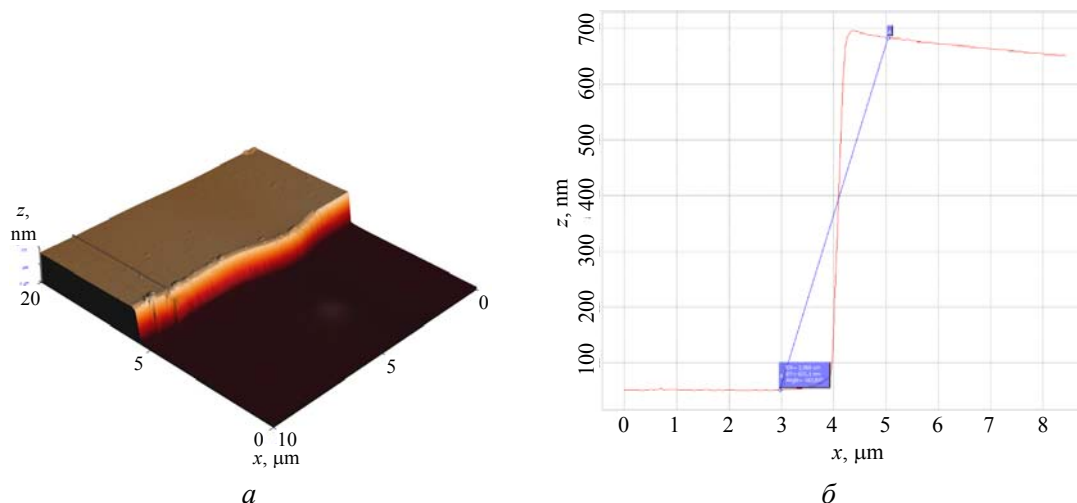


Рис. 1. АСМ-изображение (а) и профиль (б) полученной структуры

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние времени плазмохимической обработки на высоту вытравленного слоя кремния, шероховатость и угол наклона стенки структур.

На первом этапе были проведены исследования по определению закономерностей влияния времени обработки плазмохимического травления на геометрические параметры полученных наноструктур на поверхности кремниевых пластин, в частности определялось влияние времени плазмохимического травления на высоту, шероховатость и угол наклона стенки структур при плазмохимической обработке.

Анализ зависимостей показал, что при заданных режимах зависимость толщины вытравленного слоя от времени имеет линейный характер, при этом скорость травления кремния составляет 5,21 нм/сек. При увеличении дли-

тельности плазмохимической обработки шероховатость поверхности возрастает, однако на зависимости шероховатости от времени можно заметить участок насыщения, где шероховатость возрастает незначительно, но при этом значительно увеличивается доверительный интервал значения шероховатости. Большее время плазмохимической обработки приводит к увеличению анизотропии, и как следствие к увеличению угла наклона стенки структуры.

На втором этапе были проведены исследования по определению закономерностей влияния потока фторсодержащего газа при плазмохимическом травлении на геометрические параметры полученных наноструктур на поверхности кремниевых пластин, в частности определялось влияние потока SF<sub>6</sub> на высоту, шероховатость и угол наклона стенки структур при плазмохимической обработке.

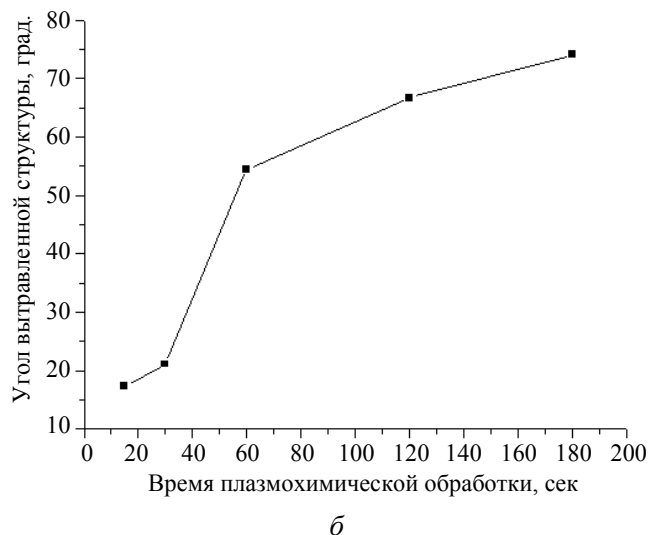
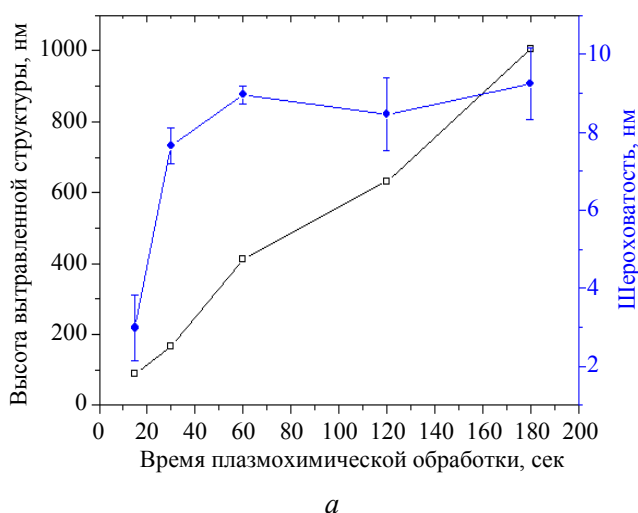


Рис. 2. Зависимости высоты и шероховатости вытравленного слоя кремния от времени плазмохимической обработки (а) и угла вытравленной структуры от времени плазмохимической обработки (б)

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований на втором этапе, отражающие влияние потока фторсодержащего газа SF<sub>6</sub> на толщину вытравленного слоя кремния, шероховатость и угол наклона стенки структур.

При увеличении потока фторсодержащего газа повышается количество активных ионов фтора в плазме, которые в свою очередь взаимодействуют с поверхностью кремния образуя легколетучие соединения с кремнием, что в

свою очередь ускоряет процесс плазмохимического травления. При повышении потока SF<sub>6</sub> происходит незначительное увеличение параметра шероховатости вытравленной поверхности, что связано с ионной бомбардировкой поверхности тяжелыми ионами SF<sub>5</sub>. Увеличение количества активных ионов фтора в плазме приводит к повышению анизотропии поверхности и соответственно к увеличению угла наклона стенки структуры.

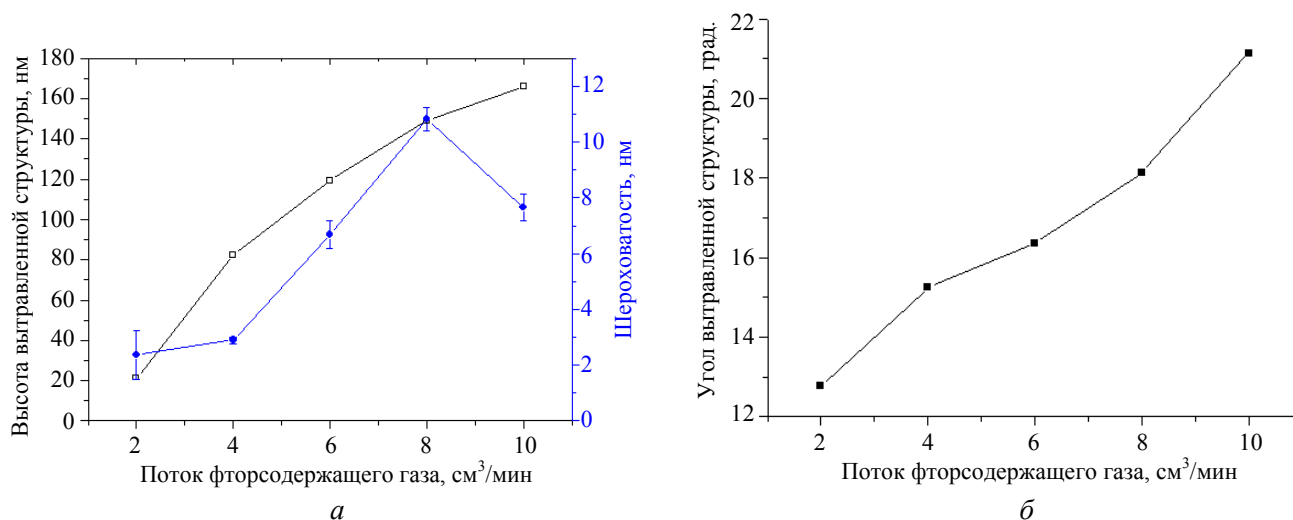


Рис. 3. Зависимости высоты и шероховатости выгравлированного слоя кремния от потока фторсодержащего газа (а) и угла выгравлированной структуры от потока фторсодержащего газа (б)

### Заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили установить закономерности влияния времени плазмохимической обработки во фторидной плазме на геометрические параметры полученных на поверхности пластин кремния наноразмерных структур. Были определены режимы, соответствующие минимальной и максимальной шероховатости выгравлированной поверхности. Выявленные экспериментальные зависимости показали, что увеличение скорости ПХТ и потока фторсодержащего газа сопровождается увеличением шероховатости и угла наклона стенок структур, так при потоке SF<sub>6</sub> равном 6 см<sup>3</sup>/мин высота структуры составила 118 нм, а шероховатость выгравлированной поверхности  $7 \pm 0,25$  нм. Увеличение времени обработки также приводит к увеличению шероховатости, так при высоте полученных структур 175 нм шероховатость составила  $7,7 \pm 0,3$  нм, при времени обработке более минуты средняя квадратичная шероховатость увеличивалась незначительно, однако наблюдался сильно развитый рельеф и увеличивалось значение шероховатости peak-to-peak, показывающее разброс между минимальным и максимальным значением.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60052.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Pant B. D., Tandon U. S. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1999. Vol. 19. P. 545.
2. Umirzakov B. E., Donaev S. B., Yorkulov R. M., Ashurov R. Kh., Rotshtein V. M. // Semiconductors. 2022. № 4. P. 266.
3. Efremov A. M., Murin D. B., Sobolev A. M. et al. // Russian Microelectronics. 2021. Vol. 50. P. 24.
4. Wu J., Ye X., Huang J. et al. // J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. 2018. Vol. 33. P. 349.
5. Bachurin V. I., Izyumov M. O., Amirov I. I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. Vol. 82. P. 127.
6. Bates R. L., Staphan Thamban P. L., Goeckner M. J., Overzet L. J. // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2014. Vol. 32. № 4. P. 0410302.
7. Kaler S. S., Lou Q., Donnelly V. M., Economou D. J. // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2016. Vol. 34. № 4. P. 532.
8. Man X., Bao N., Hao Y., Feng Y., Ma X. // Physica Status Solidi (a). 2020. № 5. P. 234.
9. Malyukov S. P., Sayenko A. V., Zinovev S. S. Proceedings – 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2020), P. 368.
10. Саенко А. В., Малюков С. П., Рожко А. А. // Прикладная физика. 2022. № 1. С. 19.
11. Zekentes K., Pezoldt J., Veliadis V. // Materials Research Foundations. 2020. Vol. 69. P. 175.
12. Deenapanray P. N. K., Athukorala C. S., Macdonald D., Jellet W. E., Franklin E., Everett V. E., Blakers A. W. // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2006. Vol. 14(7). P. 603.
13. Gaboriau F., Cartry G., Peignon M.-C., Cardinaud C. // IEEE Conference Record – Abstracts, 2002 IEEE International Conference on Plasma Science. 2002. P. 13597.
14. Alvarez H. S., Cioldin F. H., Silva A. R., Espinola L. C. J., Vaz A. R., Diniz J. A. // Journal of Microelectromechanical Systems. 2021. Vol. 30. № 4. P. 668.

15. Klimin V. S., Morozova Y. V., Kots I. N., Vakulov Z. E., Ageev O. A. // Russian Microelectronics. 2022. Vol. 51. № 4. P. 236.

16. Kots I. N., Polyakova V. V., Morozova Y. V., Kolomytsev A. S., Klimin V. S., Ageev O. A. Russian Microelectronics. 2022. Vol. 51. № 3. P. 126.

17. Dzhuplin V. N., Klimin V. S., Morozova Y. V., Rezvan A. A., Vakulov Z. E., Ageev O. A. // Russian Microelectronics. 2021. Vol. 50. № 6. P. 412.

18. Vakulov Z., Khakhulin D., Geldash A., Tominov R. V., Klimin V. S., Smirnov V. A., Ageev O. A. // Journal of Advanced Dielectrics. 2022. Vol. 12(2). P. 2160019.

19. Vakulov Z., Khakhulin D., Zamburg E., Mikhaylichenko A., Smirnov V. A., Tominov R. V., Klimin V. S., Ageev O. A. // Materials 2021. Vol. 14(17). P. 4854.

20. Vakulov Z., Geldash A., Khakhulin D., Il'ina M., Il'in O., Klimin V. S., Dzhuplin V. N., Konoplev B., He Z., Ageev O. A. // Materials. 2020. Vol. 13(18). P. 3984.

PACS: 52.25.-b

## Application of fluoride plasma for the formation of nanoscale structures on the surface of silicon

V. S. Klimin<sup>1</sup>, I. O. Kessler<sup>1</sup>, Yu. V. Morozova<sup>1</sup>, A. V. Saenko<sup>1</sup>,  
Z. E. Vakulov<sup>2</sup> and O. A. Ageev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering,  
Southern Federal University  
2 Shevchenko st., Taganrog, 347922, Russia  
E-mail: kliminvs@sfedu.ru

<sup>2</sup> Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences  
41 Chekhov st., Rostov-on-Don, 344006, Russia

Received September 19, 2022

*The purpose of this work is to study the effect of the time of plasma-chemical treatment of silicon substrates in fluoride plasma. The plasma of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) was used as a source. An analysis was made of the obtained dependences of the roughness, height, and angle of inclination formed during etching, on the time of plasma-chemical treatment, and on the flow of fluorine-containing gas. The duration of treatment in fluorine-containing plasma affects the roughness of the etched surface and the geometry of the etched area, so with longer treatment in fluoride plasma, the roughness and angle of the resulting structure increase. The study of morphology was carried out on the installation of atomic force microscopy (AFM). It was found that as the time of plasma-chemical treatment increased, the angle of the etched structure increased, the dependence of the roughness on time had conventionally two segments, intensively increasing up to 60 sec. and an area with little changing roughness, but with a large dispersion. With an increase in the flow of fluorine-containing gas, the angle of the etched structure, the height of the structure, and the roughness of the etched surface increased linearly.*

**Keywords:** plasma chemical etching, fluoride plasma, profiling of nanostructures, etching time, roughness.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-23-28

## REFERENCES

1. B. D. Pant and U. S. Tandon, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **19**, 545 (1999).
2. B. E. Umirzakov, S. B. Donaev, R. M. Yorkulov, R. Kh. Ashurov and V. M. Rotshtein, *Semiconductors*, No. 4, 266 (2022).
3. A. M. Efremov, D. B. Murin, A. M. Sobolev et al., *Russ Microelectron.* **50**, 24 (2021).
4. J. Wu, X. Ye, J. Huang et al., *J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci.* **33**, 349 (2018).
5. V. I. Bachurin, M. O. Izyumov, I. I. Amirov et al., *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **82**, 127 (2018).
6. R. L. Bates, P. L. Stephan Thamban, M. J. Goeckner and L. J. Overzet, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* **32(4)**, 0410302 (2014).
7. S. S. Kaler, Q. Lou, V. M. Donnelly and D. J. Economou, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* **34(4)**, 532 (2016).
8. X. Man, N. Bao, Y. Hao, Y. Feng and X. Ma, *Physica Status Solidi (a)*, No. 5, 234 (2020).
9. S. P. Malyukov, A. V. Sayenko and S. S. Zinovev, *Proceedings – 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2020)*, 368 (2020).
10. A. V. Saenko, S. P. Malyukov and A. A. Rozhko, *Applied Physics*, No. 1, 19 (2022) [in Russian].
11. K. Zekentes, J. Pezoldt and V. Veliadis, *Materials Research Foundations* **69**, 175 (2020).
12. P. N. K. Deenapanray, C. S. Athukorala, D. Macdonald, W. E. Jellett, E. Franklin, V. E. Everett and A. W. Blakers, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **14(7)**, 603 (2006).
13. F. Gaboriau, G. Cartry, M.-C. Peignon and C. Cardinaud, *IEEE Conference Record – Abstracts, 2002 IEEE International Conference on Plasma Science*, 13597 (2002).
14. H. S. Alvarez, F. H. Cioldin, A. R. Silva, L. C. J. Espinola, A. R. Vaz and J. A. Diniz, *Journal of Microelectromechanical Systems* **30(4)**, 668 (2021).
15. V. S. Klimin, Y. V. Morozova, I. N. Kots, Z. E. Vakulov and O. A. Ageev, *Russian Microelectronics* **51(4)**, 236 (2022).
16. I. N. Kots, V. V. Polyakova, Y. V. Morozova, A. S. Kolomyitsev, V. S. Klimin and O. A. Ageev, *Russian Microelectronics* **51(3)**, 126 (2022).
17. V. N. Dzhuplin, V. S. Klimin, Y. V. Morozova, A. A. Rezvan, Z. E. Vakulov and O. A. Ageev, *Russian Microelectronics* **50(6)**, 412 (2021).
18. Z. Vakulov, D. Khakhulin, A. Geldash, R. V. Tominov, V. S. Klimin, V. A. Smirnov and O. A. Ageev, *Journal of Advanced Dielectrics* **12(2)**, 2160019 (2022).
19. Z. Vakulov, D. Khakhulin, E. Zamburg, A. Mikhaylichenko, V. A. Smirnov, R. V. Tominov, V. S. Klimin and O. A. Ageev, *Materials* **14(17)**, 4854 (2021).
20. Z. Vakulov, A. Geldash, D. Khakhulin, M. Il'ina, O. Il'in, V. S. Klimin, V. N. Dzhuplin, B. Konoplev, Z. He and O. A. Ageev, *Materials* **13(18)**, 3984 (2020).