

УДК 621.793.7
EDN: OUUGOX

PACS: 52.77.-n

Влияние мощности источника плазмы и состава газовой смеси на параметры сформированных структур на карбиде кремния© В. С. Климин^{1,*}, И. Е. Лысенко²¹ Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета,
Ростовская область, г. Таганрог, 347922 Россия

* E-mail: kliminv.s@mail.ru

² ООО «Матпер», Москва, 109316 РоссияСтатья поступила в редакцию 31.07.2025; после доработки 27.08.2025; принята к публикации 20.02.2026
Шифр научной специальности: 2.2.2

Изучались процессы формирования структур на поверхности карбида кремния и влияние параметров процесса плазмохимической обработки на геометрические параметры сформированных структур. Экспериментально установлены корреляции между мощностью индуктивно-связанной плазмы (ИСП), составом газовой смеси ($O_2/SF_6/Ar$) и ключевыми параметрами: высотой структур, шероховатостью поверхности и углом наклона стенок. Показано, что увеличение мощности ИСП и концентрации SF_6 в газовой смеси приводит к росту скорости травления. В частности, при мощности ИСП 300 Вт и соотношении газов $O_2/SF_6/Ar$ (81/7/11) достигнуты: высота структуры $983,62 \pm 37,64$ нм, шероховатость поверхности $14,13 \pm 2,15$ нм и угол наклона $74,63 \pm 1,87^\circ$.

Ключевые слова: карбид кремния, плазмохимическое травление, фторидная плазма, формирование структур, микроэлектроника.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-54-58

Введение

Карбид кремния сохраняет статус ключевого материала не только для силовой электроники и ВЧ-устройств, но и для перспективных элементов газовых сенсоров, что обусловлено его уникальным сочетанием свойств: широкой запрещённой зоной, высокой электрической прочностью и исключительной химической стабильностью в агрессивных средах [1–3]. Последнее свойство особенно значимо для сенсорики, где элементы из карбида кремния способны длительно функционировать при повышенных температурах, обеспечивая детектирование горючих газов и токсинов в условиях, недоступных традиционным материалам [4].

Однако использование карбида кремния в стандартной технологии ограничивается его

высокой твёрдостью и химической инертностью, затрудняющими формирование микро- и наноструктур с заданной геометрией и низкой дефектностью поверхности [4–6].

Плазмохимическое травление является одним из перспективных методов создания функциональных элементов устройств на карбиде кремния, включая элементы МОП-транзисторов, МЭМС и оптические волноводы [4–7]. Для газовых сенсоров критически важны показатели морфологии поверхности вытравленной поверхности, напрямую влияющие на сорбционную ёмкость и скорость отклика [7].

Ключевыми управляемыми параметрами процесса, определяющими результирующие характеристики структур, являются мощность источника плазмы и состав газовой смеси

[8–13]. Исследования подтверждают сложную взаимосвязь этих параметров. Варьирование состава газовой смеси ($\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{N}_2$, Cl_2/Ar) влияет на химические процессы травления, скорость удаления материала и формирование пассивирующих слоёв, что определяет анизотропию и морфологию [8, 10, 14–16]. Добавки кислорода влияют на угол наклона структуры [13], а азота – ремоделирование профиля через осаждение побочных продуктов [15]. Для сенсорных применений это позволяет создавать наноструктурированные поверхности с увеличенной активной площадью. Мощность источника плазмы регулирует плотность ионов и радикалов, определяя баланс химического травления и физического распыления. Её оптимизация критична для достижения высоких скоростей [12], минимизации дефектов [5, 10, 17] и формирования структур с высоким аспектным соотношением [18–21], что актуально для миниатюризации сенсорных элементов. Однако комбинирование высокой мощности и температуры может вызывать деградацию масок [19, 22] и аморфизацию поверхности [5, 10, 20, 22], ухудшающую электронные свойства чувствительных слоёв.

Несмотря на прогресс [1–6], количественное исследование влияния совместного варьирования мощности и состава газовых смесей на параметры структур остаётся актуальным, особенно в части применения для технологических процессов создания микро- и наноструктур в сенсорике нового поколения [7, 14, 9, 23–25].

Целью данной работы является установление экспериментальных зависимостей параметров сформированных структур от режимов плазмохимической обработки при различных мощностях источников индуктивно-связанной плазмы и состава газовой смеси, включая шероховатость, угол наклона структуры, критически важных для эффективности газочувствительных элементов.

Методика эксперимента

В качестве образцов в экспериментальных исследованиях были использованы пластины карбида кремния, гексагонального поли типа 6H-SiC. На пластину карбида кремния

методом магнетронного напыления была нанесена тонкая плёнка Al толщиной 1 мкм. В работе использовался фоторезист ФП 9120-1, его сушка производилась при 110 °С в течение 15 мин. Проявление производилось в водном растворе NaOH (0,6 %) вплоть до полного вытравливания незащищённой фоторезистом поверхности алюминия. Вновь нанесённый слой фоторезиста ФП 9120-1 обеспечил защиту поверхности пластины от загрязнений при разделении образцов методом лазерной резки. Полное удаление фоторезиста производилось в кислородной индуктивно-связанной плазме в течение 3 мин, при мощности источника плазмы 650 Вт. Состав смеси O_2/Ar (87/13).

Плазмохимическая обработка образцов карбида кремния проводилась для трех групп образцов. Газовая смесь для создания плазмы для первой группы образцов имела следующий состав $\text{O}_2/\text{SF}_6/\text{Ar}$ (81/7/11); для второй группы – $\text{O}_2/\text{SF}_6/\text{Ar}$ (74/14/11); для третьей – $\text{O}_2/\text{SF}_6/\text{Ar}$ (67/21/11). Значения мощности источника индуктивно связанной плазмы для каждой группы образцов варьировались от 300 Вт до 500 Вт. Мощности источника емкостной связанной плазмы, равной 150 Вт и напряжении смещения 109 В. Рабочее давление в реакторе составляло 2,5 Па.

По завершению процесса плазмохимической обработки производилось удаление остатков защитной маски Al путём её травления в растворе NaOH (0,6 %). Затем производилось сканирование образца на профилометре. Сканирование осуществлялось в области, сформированной в процессе травления ступеньки с целью выявления её параметров. Также осуществлялось повторное сканирование подвергшейся в процессе травления воздействию плазмы поверхности карбида кремния.

Результаты экспериментов

На рис. 1 показано изображение сформированной структуры на поверхности пластины карбида кремния из первой экспериментальной группы (ступенька на рис. 1а, профиль протравленной структуры на рис. 1б).

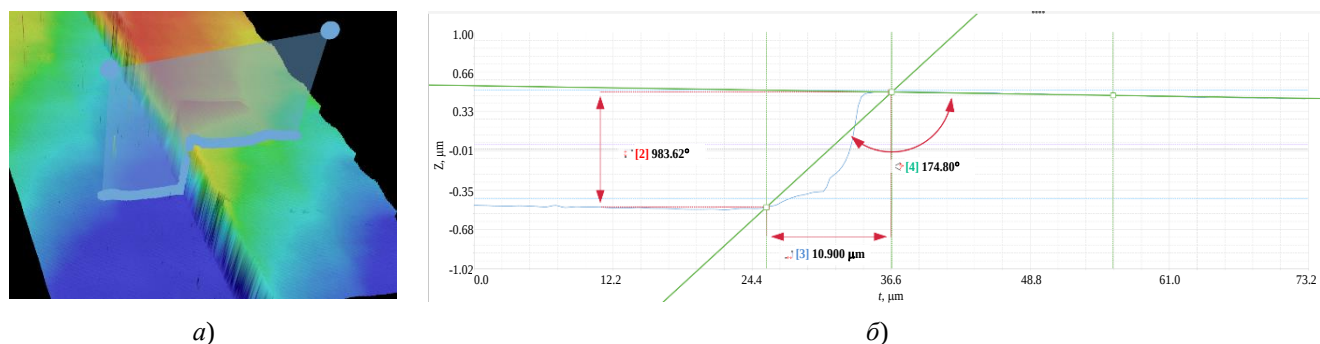


Рис. 1. Изображение (а) и профиль (б) одной из полученных структур

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований, отражающие зависимость высоты полученных структур от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси.

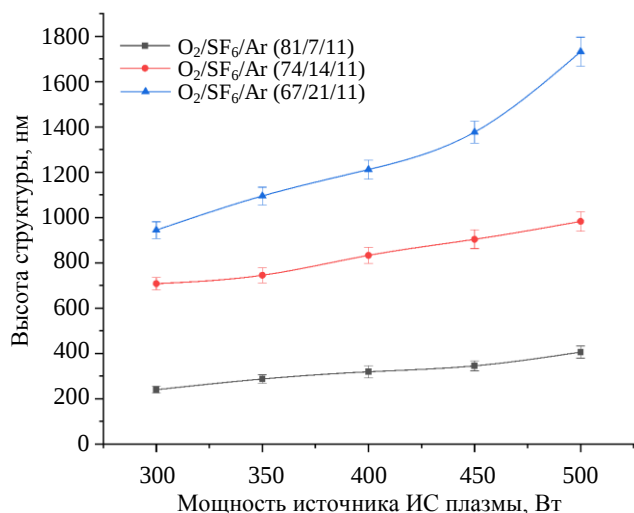


Рис. 2. Зависимости высоты вытравленного слоя карбида кремния от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси

Анализ зависимостей показал, что при заданных режимах зависимости имеют фактически линейный характер. При увеличении мощности источника плазмы растет высота структуры, что можно объяснить энергией частиц и степенью разложения реакционной газовой смеси, что приводит к интенсификации процесса. Также можно увидеть, что при увеличении доли фторсодержащего газа количество активных ионов фтора в плазме повышается, которые, в свою очередь, взаимодействуют с кремниевой составляющей структуры карбида кремния и обеспечивают тяжелые ионы для процесса реактивного ионного трав-

ления, что в свою очередь приводит к увеличению высоты сформированных структур.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси на угол наклона сформированной структуры.

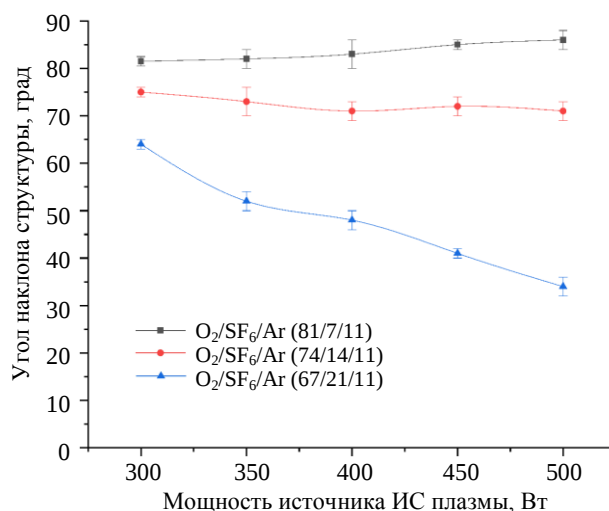


Рис. 3. Зависимости угла сформированной структуры на поверхности карбида кремния от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси

Полученная зависимость показывает, что уменьшение кислорода в смеси значительно влияет на угол структуры, который измерялся, как показано на рис. 1. Из показанной зависимости можно заключить, что при более низком значении кислорода и повышении мощности источника индуктивно связанной плазмы значение угла наклона структуры снижается. При увеличении процентного содержания кислорода в смеси значение угла наклона менялось незначительно и имеет фактически линейный характер, что коррелируется с теоретическими исследованиями.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований, отражающие влияние мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси на шероховатость вытравленной поверхности.

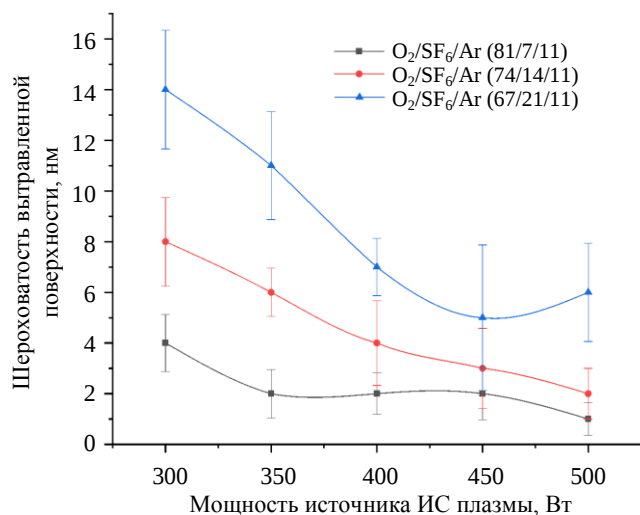


Рис. 4. Зависимости шероховатости вытравленной поверхности карбида кремния от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси

Полученная зависимость показывает, что при увеличении доли фторсодержащего газа количество тяжелых ионов увеличивается, и шероховатость вытравленной поверхности увеличивается, при увеличении мощности, вероятно, происходит процесс химической плазменной полировки и снижается составляющая, отвечающая за физическое распыление, соответственно, шероховатость вытравленной поверхности падает.

Заключение

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили установить закономерности высоты сформированных плазменным травлением структур и шероховатости вытравленной поверхности от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси. Также были получены закономерности величины угла наклона структур от мощности источника индуктивно связанной плазмы при различных соотношениях газовой смеси. Были определены режимы, соответствующие мини-

мальной и максимальной шероховатости вытравленной поверхности при задаваемых высотах структур, а также режимы формирования наклонных структур. Выявленные экспериментальные зависимости показали, что увеличение мощности источника индуктивно связанной плазмы, а также увеличение содержания фторсодержащего газа приводит к увеличению скорости плазмохимического травления, так, при мощности источника ИСП 300 Вт и составе газовой смеси O₂/SF₆/Ar (81/7/11) высота структуры на карбиде кремния составила $983,62 \pm 37,64$ нм, а шероховатость вытравленной поверхности составила $14,13 \pm 2,15$ нм, угол наклона структуры составил $74,63 \pm 1,87$ градусов. Показано, что увеличение кислорода в смеси ведет к увеличению угла наклона структуры, при этом влияние мощности на угол наклона структуры с увеличением кислородной составляющей падает.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-00722, <https://rscf.ru/project/25-29-00722/> в Южном федеральном университете. Результаты исследования получены с использованием оборудования ООО "Маннер".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Huff J., Advanced Materials Technologies **8** (12), 2201235 (2023).
- Ashurov K., et al., Semiconductor Science and Technology **38** (4), 043001 (2023).
- Klimin V. S., Kessler I. O., Morozova Yu. V., Saenko A. V., Vakulov Z. E., and Ageev O. A., Applied Physics, № 6, 23–28 (2022) [in Russian].
- Saenko A. V., Klimin V. S., Rozhko A. A., and Malyukov S. P., Journal of Communications Technology and Electronics **67**, 108–114 (2022).
- Donaev R., et al., Materials **15** (1), 123 (2022).
- Dzhuplin V. N., Klimin V. S., Morozova Y. V., Rezvan A. A., Vakulov Z. E., and Ageev O. A., Russian Microelectronics **50** (6), 412–419 (2021).
- Tan X., et al., Microelectronics Engineering **301**, 111567 (2024).
- Evans P., et al., Applied Physics Letters **102** (19), 192109 (2013).
- Kato T., et al., IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing **34** (2), 198–205 (2021).
- Li C., et al., Journal of Materials Chemistry C **12**, 18211–18237 (2024).
- Klimin V. S., Kessler I. O., Morozova Yu. V., Saenko A. V., Vakulov Z. E., and Ageev O. A., Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **86**, S96–S99 (2022).

12. Ivanov A., et al., Scientific Reports **10**, 19977 (2020).
13. Pirmaci K., et al., Journal of Vacuum Science & Technology A **35** (3), 031301 (2017).
14. Liu G., et al., ECS Journal of Solid State Science **11** (4), 043008 (2022).
15. Klimin V. S., Morozova Y. V., Kots I. N., Vakulov Z. E., and Ageev O. A., Russian Microelectronics **51** (4), 236–242 (2022).
16. Arslan S., et al., Journal of Micromechanics and Microengineering **31** (8), 085002 (2021).
17. Pant B. and Tandon U., Plasma Chemistry and Plasma Processing **19**, 545–558 (1999).
18. Popova E., et al., Vacuum **193**, 110523 (2021).
19. Wang L., et al., Materials **15** (1), 123 (2022).
20. Zhang Y., et al., Journal of Applied Physics **130** (15), 153301 (2021).
21. Saenko A. V., Vakulov Z. E., Klimin V. S., Bilyk G. E., and Malyukov S. P., Russian Microelectronics **52** (4), 297–302 (2023).
22. Miyazaki H., et al., Nanotechnology **32** (25), 255301 (2021).
23. Holst F., et al., Applied Surface Science **579**, 152189 (2022).
24. Klimin V. S., Geldash A., and Ageev O. A., Russian Microelectronics **53** (2), 117–122 (2024).

PACS: 52.77.-n

Influence of plasma power and gas mixture composition on the formation of structures on silicon carbide

V. S. Klimin^{1,*} and I. E. Lysenko²

¹ Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University,
Taganrog, Rostov Region, 347922 Russia

* E-mail: kliminvs@sfnedu.ru

² Mapper LLC, Moscow, 109316 Russia

Received 31.07.2025; revised 27.08.2025; accepted 20.02.2026

This work investigates the processes of structure formation on silicon carbide (SiC) surfaces. The influence of plasma-chemical processing parameters on the geometric characteristics of fabricated structures was examined. Correlations were established between the power of the inductively coupled plasma (ICP) source, the composition of the gas mixture (O₂/SF₆/Ar), and key structural parameters: height, surface roughness, and wall inclination angle. It was demonstrated that increasing ICP power and SF₆ concentration in the gas mixture enhances the etching rate. Processing conditions correspond to extremes in surface roughness and specific wall inclination angles were identified. Notably, under conditions of 300 W ICP power and a gas ratio of O₂/SF₆/Ar = 81/7/11, the following results were achieved: structure height of 983.62 ± 37.64 nm, surface roughness of 14.13 ± 2.15 nm, and inclination angle of 74.63 ± 1.87°.

Keywords: silicon carbide, plasma-chemical etching, fluoride plasma, structure formation, microelectronics.

Об авторах

Климин Виктор Сергеевич, к.т.н., доцент, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (347922, Россия, Ростовская область, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44). E-mail: kliminvs@sfnedu.ru SPIN-код: 1023-2994, AuthorID: 596163, Orcid ID 0000-0002-9794-4459, Scopus Author ID 57191376740

Лысенко Игорь Евгеньевич, д.т.н., руководитель проекта по организации НТО, ООО «Мэппер» (109316, Россия, Москва, Волгоградский пр. 42, к. 5). E-mail: igor.lysenko@mapperllc.ru SPIN-код: 7114-3671, AuthorID: 160157, Orcid ID 0000-0002-7505-1983, Scopus Author ID 55971078200