Влияние энергетических и химических параметров газоразрядной плазмы с морфологией и профилем структур, формируемых на поверхности карбида кремния

© В.С. Климин[1], М.Н. Григорьев[1,2], П.А. Тарасов[1,2], Д.В. Клещин[1,2], В.Н. Жирнов[1,2], В.В. Пташник[2]

[1] Институт радиотехнических систем и управления, Южный федеральный университет,
347922 Таганрог, Россия
2 АО Таганрогский научно-исследовательский институт связи,
347922 Таганрог, Россия
E-mail: kliminv.s@mail.ru

Поступила в Редакцию 14 июня 2026 г.
В окончательной редакции 17 июля 2026 г.
Принята к публикации 22 октября 2026 г.

Экспериментально исследовано формирование структур на поверхности карбида кремния методом плазмохимического травления в газах SF_6 и CCl_2F_2 при различных мощностях источника индуктивно связанной плазмы. Показано, что увеличение мощности и доли CCl_2F_2 ускоряет процесс травления. Для CCl_2F_2 при мощности 450 Вт и составе газовой смеси $O_2/CCl_2F_2/Ar$ (74 : 14 : 12) получены высота профиля 200.78 нм, шероховатость поверхности 5.11 нм и угол травления 82.23°. Полученные результаты зволяют выбирать режимы для контролируемого формирования микрорельефа на поверхности карбида кремния.

Ключевые слова: карбид кремния, плазмохимическое травление, индуктивно связанная плазма, микрорельеф, шероховатость поверхности.

DOI: 10.61011/FTP.2026.09.64168.10238

1. Введение

Микропрофилирование карбида кремния является актуальной задачей микроэлектронного приборостроения благодаря его широкозонности, высокой теплопроводности и электрической прочности, что позволяет создавать устройства нового поколения [1–3]. Плазмохимическое травление обеспечивает высокую точность и воспроизводимость формирования рельефа [4–6]. Ключевое влияние на морфологию и профиль структур оказывают такие параметры плазмы, как состав газовой смеси (SF_6, CCl_2F_2) и мощность источника индуктивно связанной плазмы (ИСП) [7,8]. Оптимизация этих параметров позволяет управлять скоростью травления, шероховатостью и углом наклона структур, что важно для контролируемого производства наноструктур на основе SiC [9–11]. В отличие от работ, направленных на создание конкретных приборных структур [12], настоящее исследование посвящено систематическому изучению влияния трех управляющих параметров (тип газа, его доля, мощность ИСП) на морфологию профиля, причем подобные комплексные данные для SF_6 и CCl_2F_2 в широком диапазоне режимов до сих пор отсутствуют.

2. Методика эксперимента

Экспериментальная часть выполнена на пластинах гексагонального карбида кремния (6*H*-SiC). Токопроводящая маска из алюминия толщиной 1 мкм сформирована методом оптической фотолитографии с использованием фоторезиста ФП 9120-1. Удаление фоторезистивного слоя проведено в плазме O_2/Ar (соотношение 85 : 15) при мощности индуктивно-связанной плазмы (ИСП) 620 Вт в течение 2.5 мин. Далее выполнялось плазмохимическое травление для двух типов газовых смесей — CCl_2F_2 и SF_6. Для каждого газа приготовлены три типа смесей с фиксированной долей аргона 12 %, при этом соотношение O_2 : газ : Ar составляло: первая группа — 81 : 7 : 12, вторая — 74 : 14 : 12, третья — 67 : 21 : 12. Мощность ИСП варьировалась от 300 до 500 Вт, параметры емкостно-связанной плазмы оставались неизменными (150 Вт, напряжение смещения 109 В), рабочее давление — 2.5 Па. После обработки алюминиевая маска удалялась в 0.6 % водном растворе NaOH. Метрологический анализ выполнялся на профилометре: измерялись геометрия сформированных структур и рельеф поверхности карбида кремния.

3. Результаты и обсуждение

По результатам экспериментальных исследований были получены микроструктуры: на рис. 1, *a* представлено изображение микроструктуры, на рис. 1, *b* показан профиль этой же структуры после процесса травления, что позволяет провести детальный анализ ее геометрических параметров.

Проведя измерения шероховатости, угла наклона структуры и высоты, были построены экспериментальные зависимости. В данной работе приведены экспериментальные зависимости высоты сформированных микроструктур от мощности источника ИСП для различных газовых смесей в реакторе. Выбранные соотношения

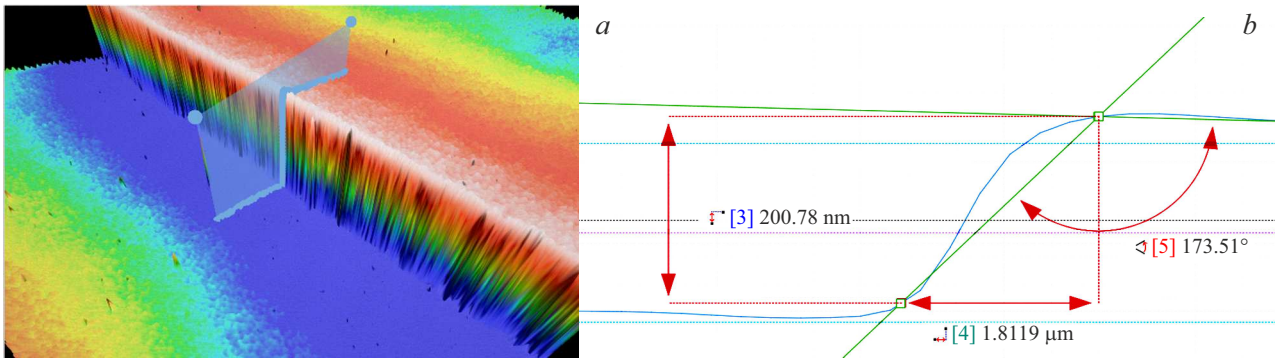


Рис. 1. Изображение (*a*) и профиль (*b*) одной из полученных структур.

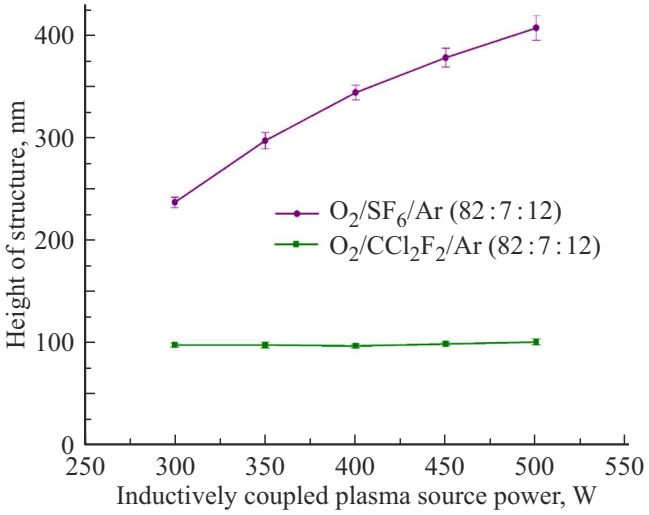


Рис. 2. Зависимости высоты вытравленного слоя карбида кремния для соотношений 82 : 7 : 12 при различных составах газовой смеси от мощности источника индуктивно связанной плазмы.

(81 : 7 : 12, 74 : 14 : 12, 67 : 21 : 12) охватывают область от низкой до высокой концентрации активного газа при фиксированной доле Ar. На рис. 2 представлены зависимости для соотношений 82 : 7 : 12 реактивных газов CCl_2F_2 и SF_6.

Для соотношений 74 : 14 : 12 результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 3.

Для соотношений 67 : 21 : 12 результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 4.

Увеличение доли фторсодержащего газа (SF_6 или CCl_2F_2) в плазме повышает концентрацию тяжелых ионов, усиливая физическое распыление и шероховатость поверхности. Рост мощности источника ИСП активирует механизм химической плазменной полировки, снижая шероховатость и сглаживая микрорельеф. Таким образом, наблюдаются два конкурирующих процесса: физическое распыление (доминирует при высокой доле газа) и химическое полирование (преобладает при высокой мощности). Сравнение двух газов показывает, что CCl_2F_2 благодаря образованию пассивирующих углерод-

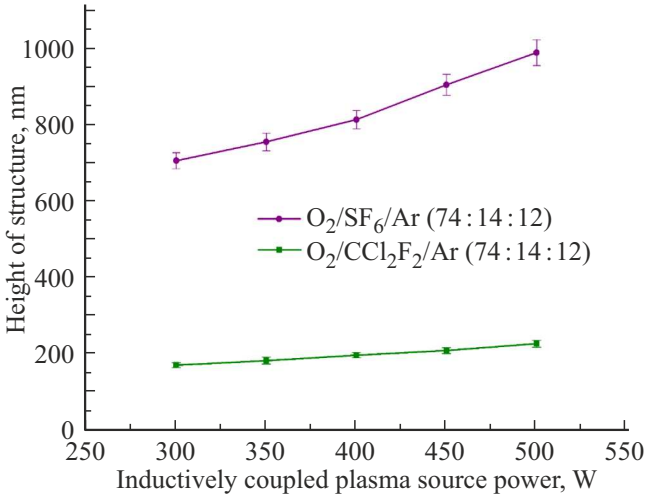


Рис. 3. Зависимости высоты вытравленного слоя карбида кремния для соотношений 74 : 14 : 12 при различных составах газовой смеси от мощности источника индуктивно связанной плазмы.

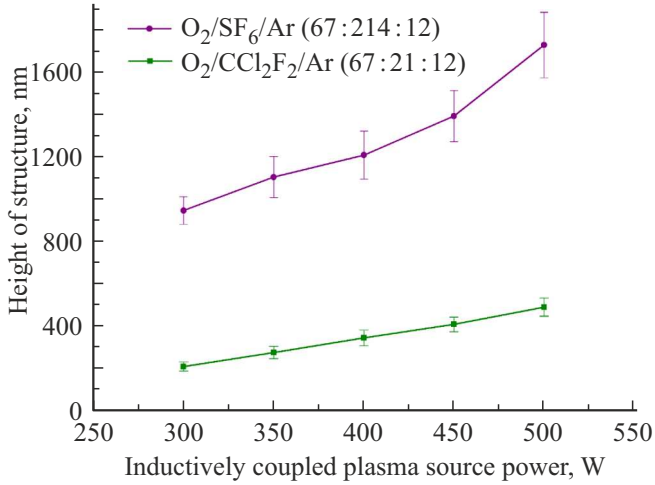


Рис. 4. Зависимости высоты вытравленного слоя карбида кремния для соотношений 67 : 21 : 12 при различных составах газовой смеси от мощности источника индуктивно связанной плазмы.

содержащих пленок обеспечивает меньшую шероховатость и лучшую управляемость профиля по сравнению с SF_6.

4. Заключение

В результате экспериментов установлено, что энергетические и химические параметры плазмы определяют морфологию и профиль структур на карбиде кремния. Для SF_6 травление происходит быстрее, тогда как CCl_2F_2 обеспечивает более технологически управляемый процесс с лучшим контролем рельефа и меньшей шероховатостью. Рост мощности ИСП и доли газа влияет на высоту, шероховатость и угол наклона. Выявлены режимы для экстремальных значений шероховатости и воспроизводимого получения заданных углов. Впервые установлены количественные зависимости между тремя управляющими параметрами и тремя выходными характеристиками, что создает основу для формирования библиотеки процессов при промышленном изготовлении SiC-структур.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-00722, https://rscf.ru/project/25-29-00722/ в Южном федеральном университете.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] H. Zhang, F. Zhang, B. Pang, Z. Liu, S. Wang, Y. Gao, H. Zhang, F. Zhang, X. Tantai, D. Xu, D. Liu, M.G. Kong. J. Appl. Phys., **130** (15), 153301 (2021). DOI: 10.1063/5.0063135
[2] M. Imaizumi, Y. Tarui, H. Sugimoto, J. Tanimura, T. Takami, T. Ozeki. Mater. Sci. Forum, **338-342**, 1057 (2000). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.338-342.1057
[3] V.S. Klimin, I.O. Kessler, Yu.V. Morozova, A.V. Saenko, Z.E. Vakulov, O.A. Ageev. Bull. Rus. Acad. Sci., ser. Phys., **86**, S96 (2022). DOI:10.3103/S1062873822700460
[4] K. Racka-Szmidt, J. Żelazko, P.P. Michałowski, A. Roguska, M. Pisarek, A. Banasiak, K. Przyborowska, B. Stańczyk, A. Harmasz, M. Sochacki. Vacuum, **240**, 114543 (2025). DOI: 10.1016/j.vacuum.2025.114543
[5] V.S. Klimin, A. Geldash, O.A. Ageev. Rus. Microelectron., **53**, 117 (2024). DOI: 10.1134/S1063739724700793
[6] L. Jiang, N.O.V. Plank, R. Cheung, M.A. Blauw, E. van der Drift. J. Phys. D: Appl. Phys., **37** (13), 1809 (2004). doi:10.1088/0022-3727/37/13/012
[7] H. Takahashi, T. Yasui, H. Kashida, K. Makino, K. Shinjo, Q. Liu, T. Shimada, S. Rahong, N. Kaji, H. Asanuma, Y. Baba. Nanotechnology, **32** (25), 255301 (2021). DOI: 10.1088/1361-6528/abef2c
[8] M. Lazar, H. Vang, P. Brosselard, C. Raynaud, P. Cremillieu, J.-L. Leclercq, A. Descamps, S. Scharnholz, D. Planson. Superlat. Microstr., **40**, 388 (2006). DOI: 10.1016/j.spmi.2006.06.015
[9] V.S. Klimin, I.O. Kessler, Yu.V. Morozova, A.V. Saenko, Z.E. Vakulov, O.A. Ageev. Appl. Phys., **6**, 23 (2022). DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-23-28
[10] K. Racka-Szmidt, B. Stonio, J. Żelazko, M. Filipiak, M. Sochacki. Materials, **15** (1), 123 (2021). DOI: 10.3390/ma15010123
[11] S. Donaev, G. Shirinov, B. Umirzakov, B. Donayev, S. Wang. Coatings, **14** (10), 1231 (2024). DOI: 10.3390/coatings14101231
[12] P.A. Ivanov, N.M. Lebedeva, N.D. Il'inskaya, T.P. Samsonova, O.I. Kon'kov. Semiconductors, **55** (4), 405 (2021). DOI: 10.1134/S1063782621040059

Редактор Г.А. Оганесян

Effect of energy and chemical parameters of gas-discharge plasma on the morphology and profile of structures formed on silicon carbide surfaces

V.S. Klimin[1], *M.N. Grigoriev*[1,2], *P.A. Tarasov*[1,2], *D.V. Kleshchin*[1,2], *V.N. Zhirnov*[1,2], *V.V. Ptashnik*[2]

[1] Institute of Radio Engineering Systems and Management,
Southern Federal University,
347922 Taganrog, Russia
[2] Taganrog Research Institute of Communications, JSC,
347922 Taganrog, Russia

Abstract The formation of structures on the silicon carbide surface by plasma-chemical etching in SF_6 and CCl_2F_2 gases at various inductively coupled plasma source powers has been studied experimentally. It is shown that an increase in power and in the CCl_2F_2 fraction accelerates the etching process. For CCl_2F_2 at a power of 450 W and a gas mixture composition of $O_2/CCl_2F_2/Ar$ (74 : 14 : 12), a profile height of 200.78 nm, a surface roughness of 5.11 nm, and an etching angle of 82.23° were obtained. The results obtained make it possible to select conditions for controlled formation of microrelief on the silicon carbide surface.