

УДК 533.924
EDN: GAATQM

PACS: 81.65.Cf

Исследование процесса плазмохимического травления диоксида кремния для изготовления изделий МЭМС

© Н. С. Каранин

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия
E-mail: karanin.ns@gmail.com**Статья поступила в редакцию 1.11.2024; после доработки 27.12.2024; принята к публикации 2.06.2025
Шифр научной специальности: 2.2.9*

Исследованы селективности травления диоксида кремния к фоторезисту, а также к кремнию в различных условиях низкотемпературной фторуглеродной ВЧ-плазме. Получены результаты по неравномерности скорости травления диоксида кремния и фоторезиста при различных условиях по поверхности кремниевой подложки диаметром 150 мм. Было установлено, что селективность травления диоксида кремния к фоторезисту и неравномерность травления обоих материалов сильно зависят от давления внутри камеры и состава газовой смеси и в меньшей степени от мощности ВЧ-разряда. Полученные результаты были использованы для травления диоксида кремния через фоторезистивную маску для формирования двуслойной защитной маски.

Ключевые слова: низкотемпературная ВЧ-плазма; емкостно-связанный источник плазмы; селективность травления; неравномерность травления; скорость травления; диоксид кремния; фоторезист.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-3-42-46

Введение

В технологии изготовления изделий МЭМС, связанной с формированием структур с высоким аспектным соотношением, активно используют глубокое реактивно-ионное травление [1, 2]. Для проведения процесса травления необходимо формировать фоторезистивную маску с высоким разрешением, что ограничивает ее толщину. При этом фоторезист обладает селективностью не более 20:1 при травлении структур в кремнии с аспектным соотношением 30:1 и выше [1], что недостаточно для изготовления изделий микроэлектромеханических систем (МЭМС), таких как акселерометры и гироскопы с толщинами приборных слоев 60 мкм и более [2], где важно обеспечить вертикальную стенку профиля травления функциональных структур. Для этих целей обычно используют диоксид кремния при травлении структур в кремнии [1, 3],

либо металлические маски при травлении структур в карбиде кремния или кварце [4]. Диоксид кремния может выступать как основным слоем, так и дополнительным, в зависимости от того, удаляется фоторезистивный слой после травления диоксида кремния или нет. Предпочтительным является второй случай, когда после травления диоксида кремния оставляют фоторезист, что позволяет формировать диоксид кремния меньше толщины. На сегодняшний день хорошо изучены условия плазмохимического травления для достижения наибольшей селективности травления диоксида кремния к кремнию в низкотемпературной ВЧ-плазме в газовой среде CHF_3 , CF_4 , а также смеси CHF_3/Ar [5, 6].

Цель работы – определить оптимальные условия плазмохимического травления для достижения наивысшего значения селективности диоксида кремния к фоторезисту, а также наименьшее значение неравномерности

скорости травления по пластине для формирования двуслойной защитной маски.

Материалы и методы

Кремниевая пластина диаметром 150 мм и толщиной 450 мкм была подвергнута высокотемпературному влажному окислению до образования диоксида кремния толщиной 2 мкм. На окисленной пластине были протравлены полости в диоксиде кремния до слоя кремния через рисунок фоторезистивной маски с последующим ее удалением. На этой же стороне была выполнена фотолитография и сформированы элементы на кремнии из фоторезиста ФП-2520. На установке реактивно-ионного травления PlasmaPro 800 на полученной заготовке были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых варьировали мощностью ВЧ-разряда, давлением внутри камеры, а также составом газовых смесей CHF_3/Ar и $\text{CF}_4/\text{CHF}_3/\text{Ar}$, объемная доля которых определялась следующим образом:

$$\sigma(\text{CHF}_3) = \frac{Q(\text{CHF}_3)}{Q(\text{CHF}_3) + Q(\text{Ar})}, \quad (1)$$

$$\sigma(\text{CF}_4) = \frac{Q(\text{CF}_4)}{Q(\text{CF}_4) + Q(\text{CHF}_3) + Q(\text{Ar})}, \quad (2)$$

где $\sigma(\text{CHF}_3)$ и $\sigma(\text{CF}_4)$ – объемные доли трифторметана (CHF_3) и тетрафторида углерода (CF_4) соответственно; $Q(\text{CHF}_3)$, $Q(\text{Ar})$, $Q(\text{CF}_4)$ – объемные расходы CHF_3 , аргона (Ar) и CF_4 соответственно. Параметры экспериментальных исследований плазмохимического травления заготовки представлены в таблице.

Измерения проводились на установке MicroProf 200 в 49 точках, расположенных равноудаленно друг от друга по пластине. Скорость травления фоторезиста ФП-2520 и диоксида кремния определяли по изменению их толщин интерференционным методом [7] с помощью датчика FTR. Скорость травления кремния – локально по изменению толщины кремниевой пластины конфокальным методом [8] с помощью двух датчиков CWL. По полученным данным определялись селективность и неравномерность скорости травления по пластине. Селективностью является отноше-

ние скоростей травления двух материалов [9] и определяется выражением:

$$s(\text{A/B}) = \frac{r_A}{r_B}, \quad (3)$$

где $s(\text{A/B})$ – селективность травления материала А по отношению к материалу В, r_A и r_B – значения скоростей травления материалов А и В соответственно.

Таблица

Параметры плазмохимического травления диоксида кремния, ФП-2520 и кремния

Наименование параметра	Предельные значения диапазона
Давление внутри камеры p , Па (мТорр)	1,33–6,67 (10–50)
Мощность ВЧ-разряда P , Вт	200–400
Объемный расход $v(\text{CHF}_3)$, см ³ /мин	0–50
Объемный расход $v(\text{Ar})$, см ³ /мин	5–50
Объемный расход $v(\text{CF}_4)$, см ³ /мин	0–25
Объемная доля $\sigma(\text{CHF}_3)$, %	9–91
Объемная доля $\sigma(\text{CF}_4)$, %	0–100
Температура подложкодержателя T , К	293
Продолжительность травления t , мин	10

Неравномерность травления δ определяли как отношение разброса значений скоростей травления к их среднему арифметическому:

$$\delta = \frac{r_{\text{макс}} - r_{\text{мин}}}{r_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

где $r_{\text{ср}}$, $r_{\text{мин}}$ и $r_{\text{макс}}$ – среднее, минимальное и максимальное значения скорости травления.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Установка реактивно-ионного травления PlasmaPro 800 имеет емкостно-связанный источник плазмы, в котором напряжение смещения на нижний электрод не регулируется напрямую [9], а зависит от параметров процесса (давление внутри камеры, мощность ВЧ-разряда и др.) и материала подложкодержателя. При травлении использовался кварце-

вый подложкодержатель, расположенный на нижнем электроде, для достижения небольших значений напряжений смещения ($U_{см} \leq 250$ В), что приводит к возникновению меньшего числа дефектов в приповерхностном слое за счет низкой энергии ионов.

На рис. 1 представлены результаты плазмохимического травления в зависимости от давления внутри камеры.

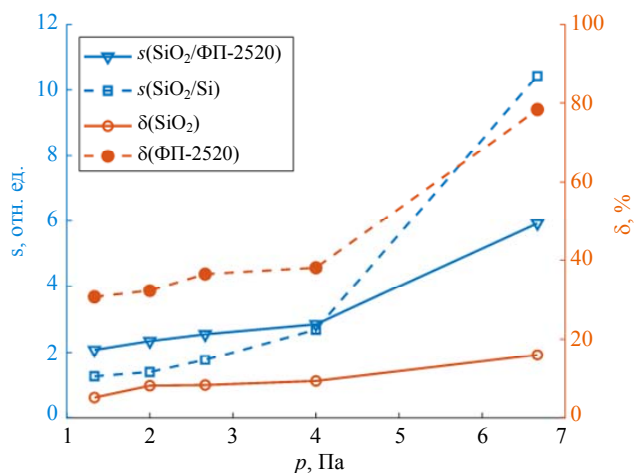


Рис. 1. Зависимости селективностей и неравномерностей травления от давления внутри камеры

На представленной зависимости (рис. 1) видно, что с повышением давления внутри камеры увеличиваются как селективности травления, так неравномерности травления, что связано с образованием полимерной пленки большей толщины [9], а также увеличением химической составляющей скорости травления диоксида кремния и снижением ионной составляющей, которая одинаково влияет на скорости травления кремния и фоторезиста.

Результаты плазмохимического травления в зависимости от мощности ВЧ-источника продемонстрированы на рис. 2.

Незначительное изменение параметров травления (рис. 2) в зависимости от мощности ВЧ-разряда объясняется пропорциональным изменением скоростей травления материалов как за счет ионной составляющей, так как повышается напряжение смещения, так и за счет повышения концентрации химически активных частиц, что сильнее увеличивает скорость травления диоксида кремния и кремния.

Зависимости селективности и неравномерности травления от объемной доли CHF_3 приведены на рис. 3. Представленные резуль-

таты коррелируются с данными, представленными в работе по исследованию селективности травления диоксида кремния к кремнию для применения в фотовольтаике [5].

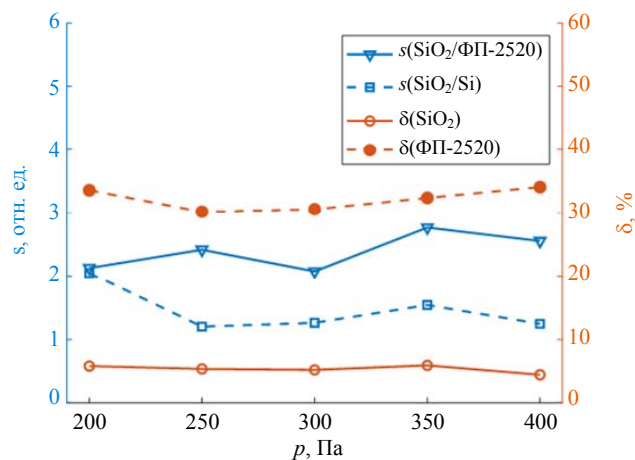


Рис. 2. Зависимости селективностей и неравномерностей травления от мощности ВЧ-разряда

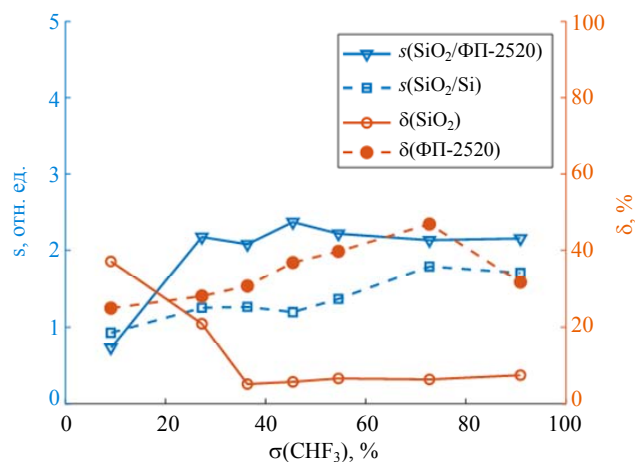


Рис. 3. Зависимости селективностей и неравномерностей травления от объемной доли CHF_3

Наиболее существенное повышение селективности травления диоксида кремния по отношению к фоторезисту происходит при объемной доле CHF_3 более 20 %, что связано с резким увеличением химической составляющей скорости травления диоксида кремния [9]. Неравномерность травления диоксида кремния существенно снижается при объемной доле CHF_3 более 40 %, при этом увеличивается неравномерность травления фоторезиста за счет большего снижения скорости травления на краю заготовки по сравнению с центром.

Результаты исследования плазмохимического травления от объемной доли CF_4 про-

демонстрированы на рис. 4. Селективность травления диоксида кремния к кремнию совпадает с характеристикой, представленной в [6].

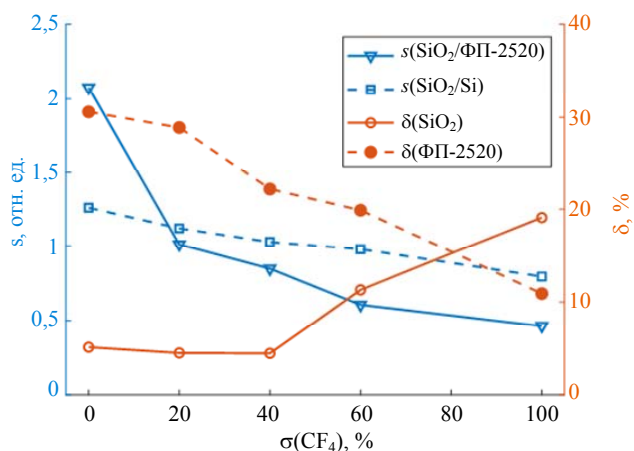


Рис. 4. Зависимости селективностей и неравномерностей травления от объемной доли CF_4

За счет повышения объемной доли CF_4 существенно повышается скорости травления фоторезиста и кремния, что приводит к снижению значений селективности травлению диоксида кремния по отношению к этим материалам. Кроме того, при объемной доле CF_4 более 40 % существенно повышается неравномерность травления диоксида кремния за счет более существенного повышения значения скорости травления в области края заготовки по отношению к центру.

Добавление CF_4 в газовую смесь при травлении диоксида кремния не является целесообразным, так как приводит к снижению селективности травления по отношению к фоторезисту. По приведенным результатам оптимальными условиями травления диоксида кремния для достижения высокой селективности и низкой неравномерности травления являются давление в камере 4 Па, мощность ВЧ-разряда 350 Вт и объемная доля CHF_3 45 %. По представленному режиму был протравлен диоксид кремния толщиной $0,70 \pm 0,05$ мкм через фоторезистивную маску, выполненную из ФП-2520, толщиной $1,95 \pm 0,05$ мкм.

Предложенные параметры режима травления позволили сформировать двухслойную защитную маску с остаточной толщиной фо-

торезиста не менее 1,75 мкм и соответствует селективности травления диоксида кремния не менее 2,1 с учетом неравномерности травления диоксида кремния не более 10 % на пластине диаметром 150 мм.

Заключение

Приведены результаты экспериментальных исследований плазмохимического травления диоксида кремния от давления внутри камеры, мощности ВЧ-разряда и различных составов газовых смесей. Представленные результаты существенно расширяют знания о плазмохимическом травлении диоксида кремния с точки зрения селективности по отношению к фоторезисту, а также неравномерностей травления исследуемых материалов. Полученные параметры травления диоксида кремния позволяют эффективно использовать двухслойные защитные маски при формировании структур с высоким аспектным соотношением для изготовления различных изделий инерциальных микроэлектромеханических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tang Y., Sandoughsaz A., Owen K. J., Najafi K. / J. Microelectromech. Syst. 2018. Vol. 27. № 4. P. 686–697.
2. Wu B., Kumar A., Pamarthy Sh. / J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. № 5. P. 051101.
3. Geisberger A., Schroeder S., Dixon J., Suzuki Y., Makwana J., Qureshi S. / 2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th Intern. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSensors XXVII). – Spain, 2013. P. 18–21.
4. Mo J., Shankar S., Pezone R. et al. / Microsyst Nanoeng. 2024. Vol. 10. № 1.
5. Gatzert C., Blakers A. W., Deenapanray P., Macdonald D., Auret F. D. / J. Vac. Sci. Technol. A. 2006. Vol. 24. № 5. P. 1857–1865.
6. Toyoda H., Komiya H., Itakura H. / J. Electron. Mater. 1980. Vol. 9. P. 569–584.
7. Kim J., Kim K., Pakh H. J. / Current Optics and Photonics. 2017. Vol. 5. № 5. P. 505–513.
8. Ma Y. D., Xiao Y. C., Wang Q. Q., Yao K., Wang X. R., Zhou Y. P., Liu Y. C., Sun Y., Duan J. / 2023 3rd International Conference on Fluid and Chemical Engineering. – China, 2023. P. 1–10.
9. Nojiri K. Dry Etching Technology for Semiconductors. – Switzerland: Springer, 2015. P. 11–30.

Investigation of the process of plasma etching of silicon dioxide for the manufacture of MEMS devices

N. S. Karanin

ITMO University, Saint Petersburg, 197101 Russia

E-mail: karanin.ns@gmail.com

Received 1.11.2024; revised 27.12.2024; accepted 2.06.2025

The etching selectivity of silicon dioxide to photoresist and to silicon was researched at different regimes of low-temperature fluorocarbon RF plasma. The results on the non-uniformity of the etching rate of silicon dioxide and photoresist were obtained at different regimes on the surface of a silicon substrate with a diameter of 150 mm. It was found the selectivity of silicon dioxide to photoresist and the etching non-uniformity of both materials highly depend at the chamber pressure and the gas mixture and, to a lesser extent, on the RF discharge power. The obtained results were used for etching silicon dioxide through a photoresist mask to form a two-layer protective mask.

Keywords: low-temperature RF plasma; capacitively coupled plasma; selectivity; non-uniformity etch rate; etch rate; silicon dioxide; photoresist.

REFERENCES

1. Tang Y., Sandoughsaz A., Owen K. J. and Najafi K., *J. Microelectromech. Syst.* **27** (4), 686–697 (2018).
2. Wu B., Kumar A. and Pamarthy Sh., *J. Appl. Phys.* **108** (5), 051101 (2010).
3. Geisberger A., Schroeder S., Dixon J., Suzuki Y., Makwana J. and Qureshi S. 2013 *Transducers & Euroensors XXVII: The 17th Intern. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*. Spain, 2013, pp. 18–21.
4. Mo J., Shankar S., Pezone R. et al., *Microsyst Nanoeng.* **10** (1), (2024).
5. Gatzert C., Blakers A. W., Deenapanray P., Macdonald D. and Auret F. D., *J. Vac. Sci. Technol. A.* **24** (5), 1857–1865 (2006).
6. Toyoda H., Komiya H. and Itakura H., *J. Electron. Mater.* **9**, 569–584 (1980).
7. Kim J., Kim K. and Pahk H. J., *Current Optics and Photonics* **5** (5), 505–513 (2017).
8. Ma Y. D., Xiao Y. C., Wang Q. Q., Yao K., Wang X. R., Zhou Y. P., Liu Y. C., Sun Y. and Duan J. 2023 *3rd Intern. Conf. on Fluid and Chemical Engineering*. China, 2023, pp. 1–10.
9. Nojiri K. *Dry Etching Technology for Semiconductors*, Switzerland: Springer, 2015.

Об авторах

Каранин Никита Сергеевич, аспирант, Университет ИТМО (197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., д. 49). E-mail: karanin.ns@gmail.com