

16. *Garmatyuk S.S. Zadachnik po ustroystvam generirovaniya i formirovaniya radiosignalov: ucheb. posobie* [Task book on devices for generating and generating radio signals: a textbook]. Taganrog: Izd-vo TPI YuFU, 2010, 736 p.
17. *Tsarapkin D.P. Stabilizatsiya chastoty vzbuditeley radiopredatchikov SVCh: ucheb. posobie* [Stabilization of the frequency of exciters of microwave radio transmitters: textbook]. Moscow: MEI, 1985, 80 p.
18. *Zikiy A.N., Zlaman P.N., Sivokoz E.V. Eksperimental'noe issledovanie dvukh avtogeneratorov s dielektricheskimi rezonatorami* [Experimental study of two self-oscillators with dielectric resonators], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Successes of modern radio electronics], 2015, No. 10, pp. 198-209.
19. *Vasilenko V.E., Belyaev D.V., Zikiy A.N., Sal'nyy I.A. Eksperimental'noe issledovanie generatornogo modulya na osnove avtogeneratora «Orsel'»* [Experimental study of the generator module based on the autogenerator "Orsel"], *Izvestiya SFedU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 3, pp. 184-187.
20. *Belov L.A., Khil'kevich V. Generatory SVCh s dielektricheskimi rezonatorami dlya stabilizatsii chastoty* [Microwave generators with dielectric resonators for frequency stabilization], *Elektronika: Nauka. Tekhnologiya. Biznes* [Electronics: Science. Technology. Business], 2006, No. 7.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Зикий Анатолий Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: zikiy50@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

Кочубей Алексей Сергеевич – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; 347909, г. Таганрог, ул. Шаумяна, 25, к. 43; тел.: 89896270939.

Zikiy Anatoliy Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: zikiy50@mail.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; associate professor.

Kochubey Aleksey Sergeevich – e-mail: l.co4ubey@yandex.ru; 25, Shaumyana street, ap. 43, Taganrog, 347909, Russia; phone: +79896270939.

УДК 621.3.49.7

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-196-203

С.В. Малохатко, Е.Ю. Гусев

ИССЛЕДОВАНИЕ МАСКИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ОКСИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ МЕМБРАН МЕТОДОМ ЖИДКОСТНОГО ТРАВЛЕНИЯ

Микроэлектромеханические датчики мембранного типа изготавливаются методами поверхностной и объемной микрообработки. В последнем случае мембраны получают путем глубокого анизотропного травления монокристаллического кремниевого слоя или подложки до толщин 20–50 мкм. При этом используются как сухие, так и жидкостным способы травления. Преимуществом жидкостного травления является простота контроля латеральных размеров мембран и высокая селективность. Высокая селективность травления может быть достигнута за счет выбора подходящего состава травящего раствора, материала защитного покрытия и технологии его получения. В работе проведено экспериментальное исследование защитных свойств пленок оксида кремния, полученных методами термического окисления, плазмохимического осаждения, а также комбинированного покрытия из этих пленок в условиях жидкостного травления монокристаллического кремния в 30%-ном водном растворе гидроксида калия при температуре 80°C. Селективность травления, остаточная толщина, шероховатость и поверхностная концентрация локальных дефектов рассчитывались по данным стилусной профилометрии, оптической интерферометрии и микроскопии. Установлено, что скорости и селективности травления тер-

мического оксида и плазмохимического оксида после быстрого термического отжига достаточно близки – 6,7 нм/мин, 1:338 и 7 нм/мин, 1:372, соответственно. Шероховатость поверхности оксидных пленок в большей степени возрастала при травлении пленок термического оксида, а также плазменного оксида в составе комбинированного покрытия. Средне-квадратичное значение остаточной шероховатости 1–2 нм. В пленках обнаружены локальные дефекты типа «протравов» с концентрацией от 0,1–0,2 мм⁻². Установлено, что использование 1 мкм плазменного слоя оксида в комбинированном покрытии позволяет предотвратить травление термического оксида, однако для исключения локальных дефектов его толщина должна быть увеличена до 1,5–2,0 мкм; пленка термически стабилизированного плазменного оксида, толщиной от 2,0 мкм также может рассматриваться в качестве эффективного защитного покрытия для проведения глубокого жидкостного травления кремния.

Объемная микрообработка; термическое окисление; плазмохимическое осаждение из газовой фазы; анизотропное жидкостное травление; защитные покрытия; оксид кремния; кремний; гидроксид калия.

S.V. Malohatko, E.Yu. Gusev

RESEARCH OF MASKING PROPERTIES OF SILICON OXIDE FILMS FOR SILICON MEMBRANE FABRICATION BY WET ETCHING

Microelectromechanical sensors of the membrane type are fabricated by surface and bulk micromachining. In the latter case, the membranes are obtained by deep anisotropic etching of a single-crystal silicon layer or substrate to a thickness of 20–50 μm. In this case, both dry and wet etching methods are used. The advantage of wet etching is easy control of the lateral dimensions of the membranes and high selectivity. High selectivity of etching can be achieved due to the choice of the appropriate composition of the etching solution, the material of the protective coating and fabrication techniques. The paper presents an experimental study of the protective properties of silicon oxide films obtained by thermal oxidation, plasma-chemical deposition, and combined coating of these films under wet etching of single-crystal silicon in a 30% aqueous solution of potassium hydroxide at a temperature of 80°C. The etching selectivity, residual thickness, roughness, and surface concentration of local defects were calculated using data of stylus profilometry, optical interferometry, and microscopy. It was found that the rates and selectivity of etching of thermal oxide and plasma chemical oxide after rapid thermal annealing are quite close – 6,7 nm/min, 1:338 and 7 nm/min, 1:372, respectively. The surface roughness of the oxide films increased more when etching the thermal oxide films, as well as the plasma oxide of composite coating. The root-mean-square values of the residual roughness were 1–2 nm. Local defects of the etched alike with a concentration of 0,1–0,2 mm⁻² were found in the films. It was found that the use of a 1 μm plasma oxide layer in a combined coating prevents etching of the thermal oxide, but to avoid local defects, its thickness should be increased to 1,5–2,0 μm; an annealed film of plasma oxide, with a thickness of 2,0 μm, can also be considered as an effective protective coating for deep wet etching of silicon.

Bulk micromachining; plasma enhanced chemical vapor deposition; thermal oxidation; anisotropic wet etching; protective coatings; silicon oxide; silicon; potassium hydroxide.

Введение. Для изготовления датчиков мембранного типа (преобразователи давления, микрофоны и гидрофоны, ультразвуковые датчики и др.) используются методы поверхностной и объемной микрообработки [1–5]. Кремниевые мембраны для таких датчиков традиционно изготавливают толщиной от 1 до 50 мкм [2–5]. При объемной микрообработке структура мембраны формируется непосредственно в кремниевой пластине, а при поверхностной – наращиванием слоев различных материалов на подложку. Одним из наиболее часто применяемых методов объемной микрообработки стало анизотропное жидкостное травление (АЖТ) монокристаллического кремния. Его преимуществами является простота, воспроизводимость и контроль горизонтальных размеров, определяемых кристаллической структурой материала [6–8]. В качестве защитных покрытий при АЖТ кремния

стандартно используют пленки оксида кремния, нитрида кремния и пленки металлов [1–5]. Пленки оксид кремния получают методами термического окисления и плазмохимического осаждения [7]. Оценка защитных свойств покрытий проводится по таким параметрам как скорость травления, однородность, а также локальная и интегральная устойчивость к травящему раствору. В зависимости от условий травления (состава травителя, его концентрации, а также температуры) выбирают защитное покрытие, сохраняющее свои маскирующие свойства в течение полного времени травления. При формировании кремниевых структур методом АЖТ применяются растворы гидроксида калия (КОН), гидроксида тетраметиламмония, этилендиамин пирокатехина и гидразина [2, 7]. Обычно используют раствор КОН, как наименее опасный травитель [6–10]. Известно, что шероховатость поверхности травления уменьшается с ростом концентрации раствора КОН, но при этом также снижается скорость травления [6–8]. В случаях, когда требуется проводить травление на большую глубину, т.е. при длительных процессах травления, предпочтительно используются растворы с концентрацией близкой к 30% при температуре 70–80 °С [6]. Травление в таком растворе через защитный слой термического оксида при 80 °С позволило получить глянцевую и однородную кремниевую поверхность [6–8]. Повышение температуры до 80 °С существенным образом сокращает время травления, однако при этом возрастает скорость травления защитного (оксидного) покрытия. В общем случае на защитные свойства оксидных покрытий оказывают влияние условия очистки подложки кремния, получения пленок, включая метод, и их последующей термической обработки, т.е. отжига [13–20]. Всестороннее изучение этого влияния на параметры и свойства оксидных пленок – защитных покрытий для АЖТ кремния является важной технологической задачей.

Цель работы заключается в исследовании защитных свойств оксидных пленок, полученных методами термического окисления и плазмохимического осаждения, в условиях анизотропного жидкостного травления кремния в 30%-ном растворе КОН при температуре 80 °С.

Методы исследования. В работе исследовали оксидные пленки, полученные методами плазмохимического осаждения и термического окисления, а также комбинированные покрытия. В качестве подложек использовали полированные с двух сторон кремниевые пластины КЭФ (100). Оксидные пленки формировали на лицевой и тыльной сторонах пластин.

Пленки SiO_x толщиной 2 мкм наносили методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PlasmaLab 100 Oxford Instruments, Oxford Instruments, Великобритания) [16]. После одну из пластин подвергали быстрому термическому отжигу (далее SiO_x, БТО) при температуре 600 °С в течение 3 минут (STE RTA70H, ЗАО «НТО», Россия).

Пленки SiO₂ формировали методом термического окисления в сухом кислороде [21]. Толщина окисла составила 600 нм.

Для получения образцов с комбинированным покрытием (SiO_x/SiO₂) на обе стороны окисленной пластины дополнительно осаждали плазменный оксид, толщиной 1 мкм. После осаждения проводили быстрый термический отжиг при температуре 600 °С в течение 3 минут.

Полученные таким образом структуры резали на образцы размером 1,5×1,5 см². Затем проводили фотолитографию с использованием пленочного фотошаблона, и жидкостное травление в растворе NH₄F: HF (6:1) для вскрытия «окон» в оксидных покрытиях. Далее образцы травили в 30%-ном растворе КОН при температуре 80 °С на глубину 270 мкм.

Значения параметров и характеристик оксидных пленок (остаточная толщина, шероховатость, размер и количество локальных дефектов) определяли методами стилусной профилометрии (Alpha-Step D-100, KLA-Tencor, США), оптической интерферометрии (МИИ-4М, ЛОМО, Россия) и микроскопии. По ним рассчитывали скорость травления, селективность и поверхностную концентрацию дефектов.

Селективность травления рассчитывали по формуле [2]:

$$S = \frac{v_{зп}}{v_{п}}, \quad (1)$$

где $v_{зп}$ – скорость травления защитного покрытия, $v_{п}$ – скорость травления подложки.

Результаты исследования и их обсуждение. В ходе работы были изготовлены структуры защитное оксидное покрытие/подложка кремния и определены скорости травления материалов. При вскрытии «окон» в защитных покрытиях в аммиачном растворе скорость травления SiO_2 составила 55 нм/мин, а SiO_x – 100 нм/мин. Скорость травления монокристаллического кремния в щелочном растворе находилась на уровне $2,6 \pm 0,1$ мкм/мин, что отличается [6]; полное время травления (на глубину 270 мкм) составило 103 минуты (рис. 1).

Соответствующие скорости травления оксидных покрытий в щелочном растворе составили 6,7 нм/мин (SiO_2), 7 нм/мин (SiO_x , БТО) и 11 нм/мин (SiO_x). Полученные значения частично удовлетворяют [6]. Экспериментальные зависимости утонения пленок показаны на рис. 1.

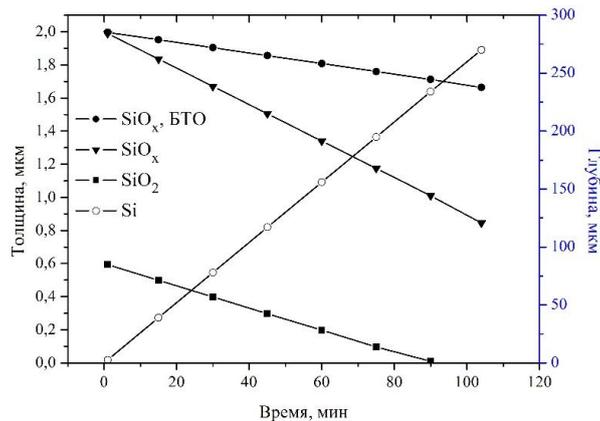


Рис. 1. Временная зависимость изменения остаточной толщины оксидных пленок и глубины травления кремния

Пленки SiO_2 полностью растворились по прошествии 90 минут. По истечению полного времени травления толщина пленок SiO_x составила $1,25 \pm 0,2$ мкм, но в них обнаружены локальные дефекты – «протравы» размерами не более 20 мкм, и в нижележащем кремнии – соответствующие им фигуры травления с характерной пирамидальной формой (рис. 2,а). Толщина пленок $\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$ составила $0,8 \pm 0,1$ мкм, но количество «протравов» больше в несколько раз, а их размеры от 5 до 50 мкм (рис. 2,б).

Анализ морфологии поверхностей оксидных пленок, проведенный методом стилусной профилометрии, позволил оценить изменение шероховатости поверхностей в процессе травления (рис. 3).

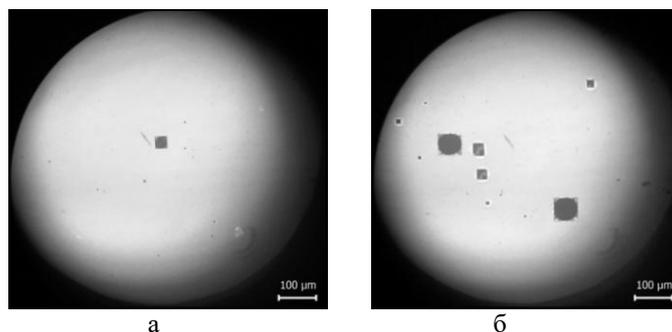


Рис. 2. Микроскопические изображения пленок оксида кремния после АЖТ:
а – плазмохимический оксид, б – комбинированное покрытие

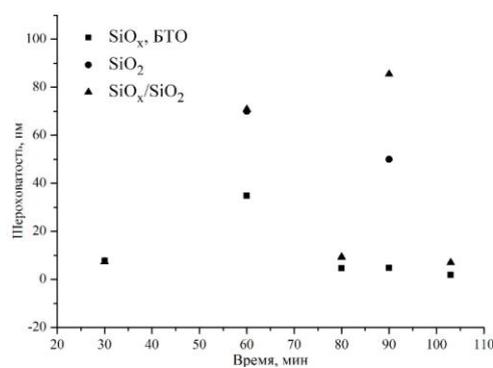


Рис. 3. Изменение среднеквадратичного значения шероховатости поверхности оксидных пленок при травлении в щелочном растворе

Из зависимостей, представленных на рис. 3, видно, что шероховатость пленок термического оксида и плазменной составляющей комбинированного покрытия возрастала в процессе травления. Это может свидетельствовать о неоднородности скорости травления по площади образцов [9, 10].

Селективность (S), среднеквадратичное значение шероховатости (Rq) и поверхностная концентрация «протравов» (N) для каждого типа покрытий указаны в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные значения параметров оксидных пленок после АЖТ

Покрытие	S	Rq	$N, \text{мм}^{-2}$
SiO ₂	1:388	-	-
SiO _x , БТО	1:372	1,2±0,4	0,1
SiO _x /SiO ₂	≤1:372	1,9±0,4	0,2

Использование слоя плазменного оксида в комбинированном покрытии позволило сохранить пленку термического оксида на поверхности подложки. Однако, толщины плазменного оксида (1 мкм) оказалось недостаточно для исключения сквозного травления: концентрация локальных дефектов в нем в 2 раза выше, чем у образцов с плазменным оксидом (SiO_x, БТО). Природа такого травления комбинированного покрытия требует более детального изучения. Предположительно увеличение толщины термического оксида до 750 нм, или, что более предпочти-

тельно, плазменного оксида до 1,5–2,0 мкм позволит исключить процесс дефектообразования при травлении кремния. Учитывая высокую скорость травления (11 нм/мин) оксида кремния, не прошедшего термический отжиг, и наличие «протравов», такие пленки, как и пленки SiO₂ толщиной менее 750 нм, не подходят для длительного глубокого травления кремния в 30%-ном растворе КОН при температуре 80°C. Для получения тонких кремниевых мембран толщиной 20–50 мкм методом жидкостного травления в качестве защитного покрытия могут быть использованы (рекомендованы) пленки термически стабилизированного плазмохимического оксида в чистом виде толщиной от 2 мкм, а также в составе комбинированного покрытия на основе термического оксида – толщиной 1,5–2 мкм. Применение последнего позволит не только исключить образование локальных дефектов в мембранных структурах, но и существенным образом сократить длительность их изготовления.

Заключение. В работе представлены результаты исследований защитных свойств оксидных покрытий в условиях анизотропного травления кремния. Воздействию 30%-ного раствора КОН при температуре 80°C подвергались три варианта защитных покрытий: пленка термического оксида, пленка плазменного оксида, а также комбинированное покрытие на основе термического оксида с дополнительным слоем плазменного оксида. Получены временные зависимости утонения оксидных пленок и изменения их шероховатости. Установлено, что скорости травления термического оксида и термически стабилизированного плазмохимического оксида практически одинаковы (7 нм/мин); в отсутствие отжига пленка плазменного оксида растворяется в 1,6 раз быстрее. Соответствующие значения селективности 1:388, 1:372. Шероховатость покрытий на основе термического оксида в процессе травления возрастала сильнее, чем у плазменного оксида, что предположительно свидетельствует о большей поверхностной неоднородности скорости травления таких пленок. При этом в пленках обнаружены локальные дефекты типа «протравов» с концентрацией от 0,1 (плазменный оксид 2,0 мкм) до 0,2 мм⁻² (комбинированное покрытие, 1,6 мкм). Установлено, что использование 1 мкм плазменного слоя оксида в комбинированном покрытии позволяет сохранить термический оксид в обозначенных условиях травления, однако для исключения локальных дефектов его толщина должна быть увеличена до 1,5–2,0 мкм. Пленка плазменного оксида, прошедшего термический отжиг, толщиной от 2,0 мкм также может рассматриваться в качестве эффективного защитного покрытия для проведения глубокого травления кремния жидкостным методом.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологических процессов изготовления датчиков мембранного типа, предполагающих использование КОН-оксид кремния в качестве пары травитель-защитное покрытие.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90087 с использованием оборудования Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нанотехнологии в микроэлектронике / под ред. О.А. Агеева, Б.Г. Коноплева. – М.: Наука, 2019. – 511 с. – ISBN 978-5-02-040201-0.
2. *Franssila Sami*. Introduction to Microfabrication. – Chichester, 2010. – 508 p.
3. *Рубцевич И.И., Соловьев Я.А., Высоцкий В. Б. [и др.]*. Исследование свойств пленок нитрида и оксида кремния, полученных методом плазмохимического осаждения на кремниевую подложку // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2011. – № 4. – С. 29-32.
4. *Киреев В.Ю.* Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии. – М.: ФГУП «ЦНИИХМ», 2008. – 428 с.

5. Лучинин В.В., Таиров Ю.М. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы. – М.: Физматлит, 2006. – 552 с.
6. Canavese G., Marasso S.L., Quaglio M. [et al.]. Polymeric mask protection for alternative KOH silicon wet etching // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2007. – Vol. 17 (7). – P. 1387-1393.
7. Kang S.-K., Hwang S.-W., Cheng H. [et al.]. Dissolution Behaviors and Applications of Silicon Oxides and Nitrides in Transient Electronics // Advanced Functional Materials. – 2014. – Vol. 24 (28). – P. 4427-4434.
8. Shikida M., Sato K., Tokoro K., Uchikawa D. Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions // Sensors and Actuators A: Physical. – 2000. – Vol. 80, No. 2. – P. 179-188.
9. Radjenović B., Radmilović-Radjenović M., Mitrić M. Level Set Approach to Anisotropic Wet Etching of Silicon // Sensors. – 2010. – Vol. 10. – P. 4950-4967.
10. Lu H., Zhang H., Jin M. [et al.]. Two-Layer Microstructures Fabricated by One-Step Anisotropic Wet Etching of Si in KOH Solution // Micromachines. – 2016. – Vol. 7 (2). – P. 19.
11. Chen J., Liu L., Li Z [et al.]. Study of anisotropic etching of (100) Si with ultrasonic agitation // Sensors and Actuators A: Physical. – 2002. – Vol. 96. – P. 152-156.
12. Debnath K., Arimoto H., Husain M. K. [et al.]. Low-Loss Silicon Waveguides and Grating Couplers Fabricated Using Anisotropic Wet Etching Technique // Frontiers in Materials. – 2016. – Vol. 3. – P. 10.
13. Gosalvez M.A., Nieminen R.M., Kilpinen P. [et al.]. Anisotropic wet chemical etching of crystalline silicon: atomistic Monte-Carlo simulations and experiments // Applied Surface Science. – 2001. – Vol. 178. – P. 7-26.
14. Пауткин В.Е., Абдуллин Ф.А., Вергазов И.П. [и др.]. Исследование травленной в растворе гидроксида калия поверхности кремния // Известия вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 10. – С. 915-921.
15. Alvi P.A., Meel V.S., Sarita K. [et al.]. A study on anisotropic etching of (100) silicon in aqueous KOH solution // Journal of Chemical Sciences. – 2008. – Vol. 6 (3). – P. 1168-1176.
16. Pal P., Sato K. Complex three dimensional structures in Si {100} using wet bulk micromachining // Micromechanics and Microengineering. – 2009. – Vol. 19 (10). – P. 105008.
17. Gusev E.Yu., Jityaeva J.Y., Ageev O.A. Effect of PECVD conditions on mechanical stress of silicon films // Materials Physics and Mechanics. – 2018. – Vol. 37, No. 1. – P. 67-72.
18. Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю., Коломийцев А.С. [и др.]. Исследование режимов жидкостного травления жертвенного слоя SiO₂ для формирования микромеханических структур на основе Si*/SiO₂/Si // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 2 (163). – С. 236-245.
19. Малохатко С.В., Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю. Проектирование и формирование кремниевых мембран для акустических датчиков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 6 (208). – С. 53-61.
20. Iosub R., Moldovan C., Modreanu M. Silicon membranes fabrication by wet anisotropic etching // Sensors and Actuators. – 2002. – Vol. 99. – P. 104-111.
21. <https://ostec-group.ru>.

REFERENCES

1. Nanotekhnologii v mikroelektronike [Nanotechnologies in microelectronics], ed. by O.A. Ageeva, B.G. Konoplyova. Moscow: Nauka, 2019, 511 p. ISBN 978-5-02-040201-0.
2. Franssila Sami. Introduction to Microfabrication. Chichester, 2010, 508 p.
3. Rubtsevich I.I., Solov'ev Ya.A., Vysotskiy V. B. [i dr.]. Issledovanie svoystv plenok nitrída i oksida kremniya, poluchennykh metodom plazmohimicheskogo osazhdeniya na kremnievuyu podlozhku [Investigation of the properties of silicon nitride and oxide films obtained by plasma-chemical deposition on a silicon substrate], *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and design in electronic equipment], 2011, No. 4, pp. 29-32.
4. Kireev V.Yu. Vvedeniye v tekhnologii mikroelektroniki i nanotekhnologii [Introduction to the technology of microelectronics and nanotechnology]. Moscow: FGUP «TSNIIKhM», 2008, 428 p.
5. Luchinin V.V., Tairov Yu.M. Nanotekhnologiya: fizika, protsessy, diagnostika, pribory [Nanotechnology: physics, processes, diagnostics, devices]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 552 p.

6. *Canavese G., Marasso S.L., Quaglio M. [et al.]*. Polymeric mask protection for alternative KOH silicon wet etching, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, Vol. 17 (7), pp. 1387-1393.
7. *Kang S.-K., Hwang S.-W., Cheng H. [et al.]*. Dissolution Behaviors and Applications of Silicon Oxides and Nitrides in Transient Electronics, *Advanced Functional Materials*, 2014, Vol. 24 (28), pp. 4427-4434.
8. *Shikida M., Sato K., Tokoro K., Uchikawa D.* Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, Vol. 80, No. 2, pp. 179-188.
9. *Radjenović B., Radmilović-Radjenović M., Mitrić M.* Level Set Approach to Anisotropic Wet Etching of Silicon, *Sensors*, 2010, Vol. 10, pp. 4950-4967.
10. *Lu H., Zhang H., Jin M. [et al.]*. Two-Layer Microstructures Fabricated by One-Step Anisotropic Wet Etching of Si in KOH Solution, *Micromachines*, 2016, Vol. 7(2), 19.
11. *Chen J., Liu L., Li Z [et al.]*. Study of anisotropic etching of (100) Si with ultrasonic agitation, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, Vol. 96, pp. 152-156.
12. *Debnath K., Arimoto H., Husain M. K. [et al.]*. Low-Loss Silicon Waveguides and Grating Couplers Fabricated Using Anisotropic Wet Etching Technique, *Frontiers in Materials*, 2016, Vol. 3, 10.
13. *Gosalvez M.A., Nieminen R.M., Kilpinen P. [et al.]*. Anisotropic wet chemical etching of crystalline silicon: atomistic Monte-Carlo simulations and experiments, *Applied Surface Science*, 2001, Vol. 178, pp. 7-26.
14. *Pautkin V.E., Abdullin F.A., Vergazov I.R. [i dr.]*. Issledovanie travlenoy v rastvore gidroksida kaliya poverkhnosti kremniya [Investigation of the silicon surface etched in a solution of potassium hydroxide], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie [Izvestiya vuzov. Instrumentation]*, 2018, Vol. 61, No. 10, pp. 915-921.
15. *Alvi P.A, Meel V.S., Sarita K. [et al.]*. A study on anisotropic etching of (100) silicon in aqueous KOH solution, *Journal of Chemical Sciences*, 2008, Vol. 6 (3), pp. 1168-1176.
16. *Pal P., Sato K.* Complex three dimensional structures in Si {100} using wet bulk micromachining, *Micromechanics and Microengineering*, 2009, Vol. 19 (10), 105008.
17. *Gusev E.Yu., Jityaeva J.Y., Ageev O.A.* Effect of PECVD conditions on mechanical stress of silicon films, *Materials Physics and Mechanics*, 2018, Vol. 37, No. 1, pp. 67-72.
18. *Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu., Kolomiitsev A.S. [i dr.]*. Issledovanie rezhimov zhidkostnogo travleniya zhertvennogo sloya SiO₂ dlya formirovaniya mikromekhanicheskikh struktur na osnove Si*/SiO₂/Si [Investigation of the modes of liquid etching of the sacrificial SiO₂ layer for the formation of micromechanical structures based on Si*/SiO₂/Si], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2015, No. 2 (163), pp. 236-245.
19. *Malokhatko S.V., Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu.* Proektirovanie i formirovanie kremnievykh membran dlya akusticheskikh datchikov [The design and formation of the silica membranes for acoustic sensors], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2019, No. 6 (208), pp. 53-61.
20. *Iosub R., Moldovan C., Modreanu M.* Silicon membranes fabrication by wet anisotropic etching, *Sensors and Actuators*, 2002, Vol. 99, pp. 104-111.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Малохатко Софья Владимировна – Южный федеральный университет; e-mail: malohatko.sofya@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +79289003841; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Гусев Евгений Юрьевич – e-mail: eyugusev@sfedu.ru; тел: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Malohatko Sofya Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: malohatko.sofya@yandex.ru; 2, Shevchenko street, build E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79289003841; the department of nanotechnology and microsystem technics; postgraduate.

Gusev Evgeny Yurievich – e-mail: eyugusev@sfedu.ru; phone: +78643371611; the department of nanotechnology and microsystem technics; cand. of eng. sc.; associate professor.