

СОЗДАНИЕ НОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУР ДАТЧИКОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ МИКРООБРАБОТКИ КРЕМНИЯ

А. А. Филатова¹, В. Е. Пауткин², Д. В. Тразанов³

^{1,2,3} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

¹nsmvaa@gmail.ru, ²pautkin_ve@niifi.ru, ³dtrazanov00@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Описаны основные защитные маскирующие слои, применяемые при формировании датчиков информационно-измерительных систем методами анизотропного травления кремния. К числу таких слоев относятся пленки диоксида и нитрида кремния, наносимые на поверхность кремниевых пластин перед технологическими операциями анизотропного травления. *Материалы и методы.* Показано, что при использовании комбинированных масок, состоящих как минимум из двух защитных слоев, возможно формирование кремниевых структур, имеющих сложный профиль травления. Это повышает технологичность изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков, так как формирование топологии маски на поверхности кремниевых пластин приводит к повышению качества изготовления и позволяет создавать новые структуры чувствительных элементов датчиков. *Результаты и выводы.* Данные технические решения позволяют создавать новые элементы структур датчиков ИИС, а также повысить технологичность их изготовления.

Ключевые слова: датчик, информационно-измерительные системы, микрообработка кремния, чувствительный элемент, селективность травления, маскирующий слой

Для цитирования: Филатова А. А., Пауткин В. Е., Тразанов Д. В. Создание новых элементов структур датчиков информационно-измерительных систем на основе технологий микрообработки кремния // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 3. С. 46–51. doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-6

CREATION OF NEW ELEMENTS OF SENSOR STRUCTURES OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS BASED ON SILICON MICROPROCESSING TECHNOLOGIES

A.A. Filatova¹, V.E. Pautkin², D.V. Trazanov³

^{1,2,3} Scientific-Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

¹nsmvaa@gmail.ru, ²pautkin_ve@niifi.ru, ³dtrazanov00@mail.ru

Abstract. *Background.* The main protective masking layers used in the formation of sensors of information-measurement systems by anisotropic etching of silicon are described. Such layers include films of silicon dioxide and nitride applied to the surface of silicon wafers before technological operations of anisotropic etching. *Materials and methods.* It is shown that when using combined masks consisting of at least two protective layers, it is possible to form silicon structures with sensors having a complex etching profile. This increases the manufacturability of the sensitive elements of micromechanical sensors, since the formation of the mask topology on the surface of silicon wafers leads to improved manufacturing quality and allows you to create new structures of sensitive sensor elements. *Results and conclusions.* These technical solutions make it possible to create new elements of sensor structures of information-measurement systems (IMS), as well as to increase the manufacturability of their manufacture.

Keywords: sensor, information-measurement systems, silicon microprocessing, sensitive element, etching selectivity, masking layer

For citation: Filatova A.A., Pautkin V.E., Trazanov D.V. Creation of new elements of sensor structures of information and measurement systems based on silicon microprocessing technologies. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(3):46–51. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-3-6

Введение

Преимущества микромеханических датчиков заключаются в их компактности и миниатюрности, а также в способности сохранять работоспособность в течение длительного времени, обеспечивая при этом высокую чувствительность, быстродействие, скорость измерения [1]. Чувствительный элемент микромеханических датчиков содержит кремниевый кристалл, выполненный методом объемной и поверхностной микрообработки кремния из исходной кремниевой пластины. Точность выполнения конструктивных элементов кристалла определяет параметры микромеханического датчика. Так, собственная частота чувствительного элемента зависит от таких параметров, как масса конструкции, коэффициент жесткости, который в свою очередь зависит от геометрических размеров упругого элемента кремниевого кристалла [2]:

$$G_y = 4\pi^2 f^2 m \left(\frac{a_m^2}{3} + \frac{c_m^2}{12} \right), \quad (1)$$

где G_y – угловая жесткость подвеса маятникового ЧЭ; f – собственная частота чувствительного элемента, Гц; m – масса ЧЭ, кг; a_m – длина чувствительной массы, м; c_m – толщина чувствительной массы, м.

В технологии микромеханических датчиков упругие элементы кристалла выполняются методом анизотропного травления кремния в едином технологическом процессе [3]. Наиболее распространенным травителем при этом является водный раствор гидроксида калия КОН с концентрацией 25–40 %. При выполнении кристалла методами анизотропного травления актуальной остается проблема защиты поверхности при глубинном травлении, которая решается выбором подходящих маскирующих слоев. Особенно остро данная проблема возникает при получении упругих элементов, имеющих сложное сечение профиля.

Защитные маскирующие покрытия

Маской при травлении кремния в растворах КОН чаще всего являются слои оксида (толщиной 0,4...1,2 мкм) и нитрида кремния (толщиной 0,3...0,7 мкм). Их выбор обусловлен следующим. Оксид кремния в растворах КОН имеет скорость травления 0,4–1,5 мкм/ч, что на порядок ниже скорости травления кремния в указанном растворе (рис. 1). Это позволяет рассчитать необходимую толщину маскирующего слоя, исходя из скоростей травления кремния и его оксида [4].

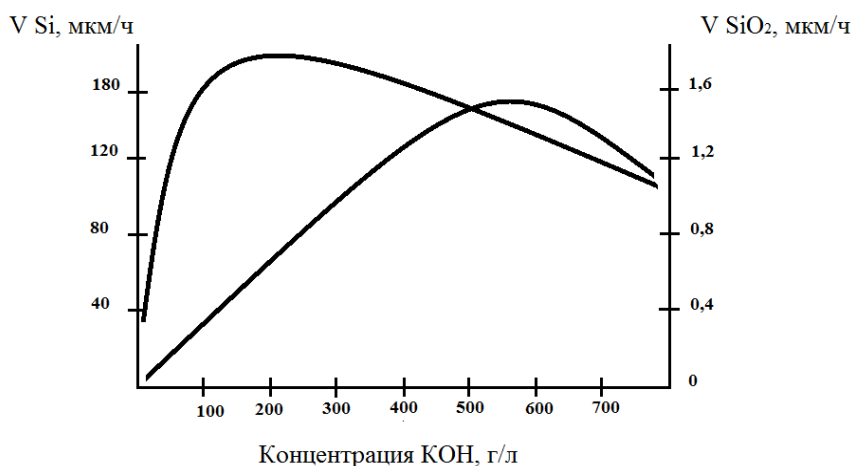


Рис. 1. Зависимость скорости травления кремния и оксида кремния от концентрации щелочи при температуре 370–371 К [4]

Оксид кремния SiO_2 чаще всего получают методом термического окисления кремниевых пластин. Такой диоксид может быть также использован как маска при сухом травлении толстых поликремниевых пленок, так как он химически устойчив к «сухой» химии травления поликремния. При анизотропном травлении кремния с ориентацией защитной маски, стороны которой ориентированы вдоль кристаллографического направления [100], кремний подтравливается под край маски на величину, равную глубине травления, при этом на кремниевой пластине может наблюдаться исходная маска из диоксида кремния, как представлено на рис. 2.

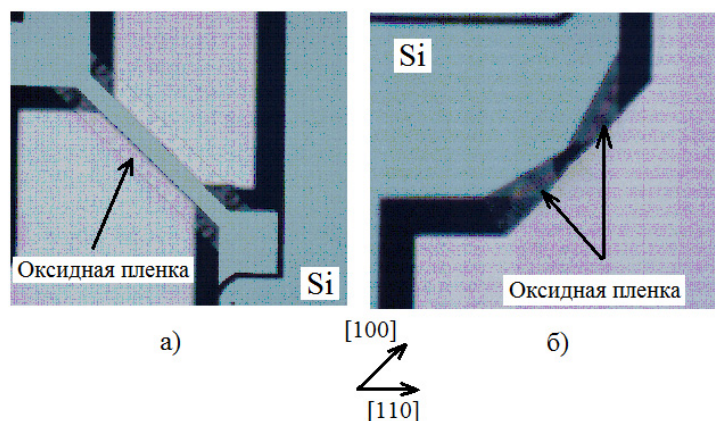


Рис. 2. Протравленные микроструктуры из кремния

Пленки нитрида кремния Si_3N_4 практически не травятся в растворах KOH , что также позволяет использовать их в качестве маскирующих слоев при глубинном травлении кремния. Кроме этого, пленки нитрида не травятся в растворах азотной и ортофосфорной кислот, которые могут быть использованы в промежуточных технологических операциях формирования кремниевых микроструктур.

Нитрид кремния Si_3N_4 , помимо защитных маскирующих покрытий, применяется в качестве диэлектрического слоя, пассивирующих слоев. Обычно используют два метода осаждения нитрида кремния – осаждение при низком давлении (*LPCVD – low pressure chemical vapour deposition*) и осаждение, усиленное плазмой (*PECVD – plasma-enhanced chemical vapour deposition*). Пленки нитрида, полученные *PECVD*-методом, имеют, как правило, нестехиометрический состав и могут содержать значительные концентрации водорода, что увеличивает пористость пленок. В силу этого снижается их стойкость в растворах плавиковой кислоты HF , применяемой в технологических процессах, однако такие пленки характеризуются внутренним совершенством, почти не имеют внутренних напряжений и могут использоваться в конструктивно-технологических решениях датчиков, предполагающих инкапсуляцию и упаковку микроструктур. Пленки нитрида, полученные *LPCVD*-методом, весьма устойчивы к воздействию химических веществ, что делает выбор этого материала привлекательным в технологии объемной микрообработки кремния в качестве маскирующего слоя [5, 6].

Указанные маскирующие слои используются и в технологии производства интегральных микросхем (ИМС), технологии создания которых хорошо отработаны. Несмотря на это, в технологии датчиков при формировании защитных маскирующих покрытий существует проблема их стойкости к химическим веществам и растворам, применяемым в технологических процессах изготовления, что связано с необходимостью глубокого профилирования кремниевых пластин. В работе [7] сообщается о применении термически выращенного кремния при локальном травлении и возникающих сложностях при проведении процесса – низкая селективность скорости травления кремния по отношению к его оксиду значительно усложняет получение глубоких структур в пластинах кремния, эта проблема возрастает с увеличением диаметра и толщины пластин. В плазмохимических процессах формирования ЧЭ датчиков селективность травления одних материалов по отношению к другим зависит от параметров плазмы – частоты ВЧ-смещения, давления, концентрации газов в рабочей камере и пр. [8–11]. Процесс травления может влиять на материал маскирующего слоя. Например, при травлении в плазме элегаза SF_6 ряд маскирующих материалов может играть роль катализатора, высвобождая дополнительный фтор, что отрицательно влияет на параметры процесса травления. В силу этого желателен выбор химически нейтрального по отношению к травящему газу материала [12]. В случае с SF_6 таким материалом может являться диоксид кремния. При анизотропном профилировании пластин кремния в щелочных растворах предъявляются высокие требования к технологическому процессу, заключающиеся в высоких требованиях к селективности маски по отношению к кремнию (не менее 300), а также к равномерности травления по пластине [13, 14].

Комбинированная защитная маска

Известно, что селективность травления, или избирательное травление – это травление преимущественно одного материала по сравнению с другим, который обладает гораздо меньшей скоростью травления. На основе этого, используя свойства материалов, возможна комбинация

защитных маскирующих покрытий, позволяющая создавать на поверхности кремниевых пластин сложные защитные маски. Это особенно актуально при формировании микроструктур сложного профиля, которые можно сформировать с применением комбинированной защитной маски (рис. 3).



Рис. 3. Кремниевые микроструктуры сложного профиля

Формирование защитных слоев на пластине возможно после каждой технологической операции, но при этом формирование топологии маски методами фотолитографии невозможно после глубокого травления кремния. Допустимая глубина для дальнейшего литографического переноса структуры маски на профилированной пластине зависит от доступных технологических возможностей и требуемой точности формирования рисунка маски. Как правило, после травления кремния на глубину не более 10 мкм защитная маска удаляется, при этом обрабатываемая пластина может рассматриваться как плоская. В случае, когда пластина травится на большие глубины, необходима комбинированная маска, состоящая из нескольких слоев, каждый из которых имеет свою сформированную топологию. Это связано с тем, что профилированная пластина имеет глубокие рельефы, на которых затруднены операции нанесения фоторезиста и проведение процессов фотолитографии.

При травлении кремния каждый слой комбинированной маски действует последовательно, такая маска должна быть сформирована на поверхности кремниевой пластины до начала операций травления. Для каждого слоя маски возможен различный материал. Необходимы, по крайней мере, два селективно удаляемых материала. Последовательное открытие окон под травление путем выборочного селективного удаления защитных слоев и травление кремния между операциями удаления слоев создают серию углублений в кремнии промежуточной глубины. Защитные слои должны быть нанесены на пластину последовательно, методами фотолитографии в каждом из защитных слоев селективно открывают окна к кремнию. Каждое окно в каждом защитном слое действует во время всех последующих операций травления. Как правило, окно под травление в последующем слое больше, чем в предыдущем. Таким образом, последний защитный слой действует как первая маска при травлении кремния и т.д.

Известен ряд технологических решений, направленных на формирование в объеме кремниевой подложки микроструктур сложного профиля с использованием комбинированной защитной маски.

Например, на кремниевой пластине создают первый защитный маскирующий слой, представляющий собой пленку термически выращенного оксида кремния. Проводят операцию фотолитографии, заключающуюся в нанесении фоторезиста, экспонировании через фотошаблон, проявлении и термообработке до появления кремния в области максимальной глубины структуры (рис. 4).

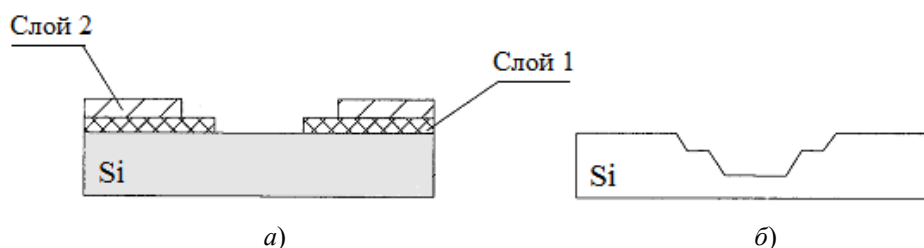


Рис. 4. Формирование микроструктуры сложного профиля:
а – формирование маскирующих слоев на кремниевой пластине;
б – полученная микроструктура сложного профиля

После этого на первый защитный маскирующий слой наносят второй маскирующий слой из материала, при химической обработке селективного по отношению к оксиду кремния. Методами фотолитографии формируют топологию второго защитного слоя. В травителях, не реагирующих или плохо реагирующих с маскирующим слоем оксида кремния и вторым маскирующим слоем, вытравливают кремний до промежуточной глубины. Таким травителем может

являться водный раствор гидроксида калия КОН. Затем, чередуя травление первого маскирующего слоя и кремния, получают заданный профиль. Данное техническое решение позволяет повысить точность изготовления профилированных кремниевых структур и повысить технологичность изготовления за счет применения комбинации защитных маскирующих слоев, химически селективных по отношению друг к другу.

Заключение

Процесс создания топологии защитных покрытий на поверхности кремниевых пластин при глубоком анизотропном травлении кремния является важной технологической операцией формирования кристаллов чувствительных элементов микромеханических датчиков. Применяя комбинированные защитные маски, состоящие как минимум из двух химически селективных защитных слоев, возможно формирование кремниевых микроструктур, имеющих сложный профиль травления. Это позволяет повысить технологичность изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков за счет формирования топологии маски на поверхности кремниевых пластин, что приводит к повышению качества изготовления и позволяет создавать новые структуры чувствительных элементов датчиков. Датчики ИИС, использующие данные структуры, могут находить применение в ракетно-космической отрасли, а именно: в системах бортовых измерений, электропитания и обеспечения работоспособности бортовой аппаратуры, ориентации и управления двигателем.

Список литературы

1. Люцко К. С., Гайкевич Д. Н. МЭМС-датчики давления // Приборостроение – 2023 : сб. докл. 16-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 2023. С. 408–409.
2. Лысенко И. Е., Ежова О. А. Исследование влияния параметров элементов подвесов на собственную частоту конструкции микромеханического сенсора линейных ускорений // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 6. С. 386–388.
3. Пауткин В. Е., Прилуцкая С. В. Геометрическое стоп-травление в технологии микроэлектромеханических систем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 4. С. 50–54.
4. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств : справочник. М. : Радио и связь, 1991. 528 с.
5. Monk D. J., Soane D. S., Howe R. T. Enhanced Removal of Sacrificial Layers for Silicon Surface Micromachining // Technical Digest : the 7th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. Yokohama, Japan, 1993. P. 280–283.
6. French P. J., Sarro P. M., Mallee R. [et al.]. Optimization of a Low-Stress Silicon Nitride Process for Surface Micromachining Applications // Sensors and Actuators. 1997. № A 58. P. 149–157.
7. Веселов Д. С., Воронов Ю. А. Особенности применения жидкостного травления кремния в технологии изготовления МЭМС-структур // Датчики и системы. 2016. № 4. С. 26–28.
8. Li Y. X., French P. J., Wolffenbuttel R. F. Selective reactive ion etching of silicon nitride over silicon using CHF_3 with N_2 addition // Vacuum Science and Technology. 1995. № B 13. P. 2008–2012.
9. Абдуллаев Д. А., Зайцев А. А., Кельм Е. А. Селективное плазмохимическое травление нитрида кремния относительно оксида кремния // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 2. С. 17–19.
10. Байдакова Н. А., Вербус В. А., Морозова Е. Е. [и др.]. Селективное травление Si, SiGe и Ge и использование его для повышения эффективности кремниевых солнечных элементов // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, вып. 12. С. 1599–1604.
11. Королев М. А., Крупкина Т. Ю., Ревелева М. А. Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. А. Чаплыгина. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. Ч. 1. Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование. 397 с.
12. Legtenberg R., Jansen H., de Boer M., Elwenspoek M. Anisotropic Reactive Ion Etching of Silicon Using $\text{SF}_6/\text{O}_2/\text{CHF}_3$ Gas Mixtures // Electrochemical Society. 1995. Vol. 142, № 6. P. 2020–2028.
13. Соколов Л. В., Жуков А. А., Парфенов Н. М., Ануров А. Е. Анализ современных технологий объемного микропрофилирования кремния для производства чувствительных элементов датчиков и МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 10. С. 27–35.
14. Соколов Л. В., Парфенов Н. М. Технологические особенности формирования трехмерных МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 19–26.

References

1. Lyutsko K.S., Gaykevich D.N. MEMS pressure sensors. *Priborostroenie–2023: sb. dokl. 16-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Instrument engineering–2023 : collection of the 16th International scientific and technical conf.* Minsk, 2023:408–409. (In Russ.)
2. Lysenko I.E., Ezhova O.A. Investigation of the effect of suspension element parameters on the natural frequency of a micromechanical linear acceleration sensor design. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering*. 2016;18(6):386–388. (In Russ.)

3. Pautkin V.E., Prilutskaya S.V. Geometric stop etching in microelectromechanical systems technology. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2017;(4): 50–54. (In Russ.)
4. Gotra Z.Yu. *Tekhnologiya mikroelektronnykh ustroystv: spravochnik = Technology of microelectronic devices: reference book.* Moscow: Radio i svyaz', 1991:528. (In Russ.)
5. Monk D.J., Soane D.S., Howe R.T. Enhanced Removal of Sacrificial Layers for Silicon Surface Micromachining. *Technical Digest : the 7th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators.* Yokohama, Japan, 1993:280–283.
6. French P.J., Sarro P.M., Mallee R. et al. Optimization of a Low-Stress Silicon Nitride Process for Surface Micromachining Applications. *Sensors and Actuators.* 1997;(A 58):149–157.
7. Veselov D.S., Voronov Yu.A. Features of the application of liquid etching of silicon in the manufacturing technology of MEMS structures. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems.* 2016;(4):26–28. (In Russ.)
8. Li Y.X., French P.J., Wolffenbuttel R.F. Selective reactive ion etching of silicon nitride over silicon using CHF₃ with N₂ addition. *Vacuum Science and Technology.* 1995;(B 13):2008–2012.
9. Abdullaev D.A., Zaytsev A.A., Kel'm E.A. Selective plasmochemical etching of silicon nitride relative to silicon oxide. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering.* 2014;(2):17–19. (In Russ.)
10. Baydakova N.A., Verbus V.A., Morozova E.E. et al. Selective etching of Si, SiGe and Ge and its use to increase the efficiency of silicon solar cells. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors.* 2017;51(12):1599–1604. (In Russ.)
11. Korolev M.A., Krupkina T.Yu., Reveleva M.A. *Tekhnologiya, konstruktivnykh i metody modelirovaniya kremnievykh integral'nykh mikroskhem: v 2 ch. = Technology, designs and modeling methods of silicon integrated circuits: in 2 parts.* Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2007;(part 1):397. (In Russ.)
12. Legtenberg R., Jansen H., de Boer M., Elwenspoek M. Anisotropic Reactive Ion Etching of Silicon Using SF₆/O₂/CHF₃ Gas Mixtures. *Electrochemical Society.* 1995;142(6):2020–2028.
13. Sokolov L.V., Zhukov A.A., Parfenov N.M., Anurov A.E. Analysis of modern technologies of volumetric microprofiling of silicon for the production of sensitive elements of sensors and MEMS. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering.* 2014;(10):27–35. (In Russ.)
14. Sokolov L.V., Parfenov N.M. Technological features of the formation of three-dimensional MEMS. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem engineering.* 2011;(11):19–26. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анна Антоновна Филатова

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nsmvaa@gmail.com

Anna A. Filatova

Design engineer,
Scientific-Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Валерий Евгеньевич Пауткин

кандидат технических наук, начальник отдела,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: pautkin_ve@niifi.ru

Valeriy E. Pautkin

Candidate of technical sciences,
head of department,
Scientific-Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Дмитрий Владиславович Тразанов

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: dtrazanov00@mail.ru

Dmitriy V. Trazanov

Design engineer,
Scientific-Research Institute
of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 20.03.2025

Поступила после рецензирования/Revised 20.04.2025

Принята к публикации/Accepted 14.05.2025