

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ /
PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY**

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2024. Т. 27, № 3. С. 278—282.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202405.586

УДК 621.315

**Высокочастотные вольт–фарадные характеристики
мембранных структур на основе $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$**

© 2024 г. Д. А. Белорусов, Е. И. Гольдман, М. С. Афанасьев, Г. В. Чучева✉

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук (фрязинский филиал),
пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: gvc@ms.ire.rssi.ru

Аннотация. Изготовление сегнетоэлектрических структур мембранного типа проводилось в несколько последовательных операций. Сначала на кремниевой (100) пластине n -типа толщиной 250 мкм с естественным окислом на поверхностях в растворе плавиковой кислоты состава 70 % (вес.) HF + 30 % (вес.) H₂O вытраивались лунки и получалась мембранная заготовка. Диаметр выемок в кремниевой пластине у основания составлял 1,2 мм. Затем на плоскую поверхность мембранной заготовки осаждались 300 нм слой $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ и контактные электроды. Минимальная толщина подложки из n -Si составила 20 мкм. При комнатной температуре проведены сравнительные измерения высокочастотных вольт–фарадных характеристик объектов металл–сегнетоэлектрик–полупроводник, выращенных на тонкой (20 мкм) и толстой (750 мкм) подложках. Обнаружено изменение емкостных свойств образцов с уменьшением толщины подложки, на которой они сформированы. У выращенных на тонкой подложке объектов, по сравнению со сформированными на толстой, ветви вольт–фарадной характеристики сдвинуты в сторону отрицательных напряжений на 4 В и ширина петли гистерезиса на 3–4 В больше. Снижение «зажатости» пленки сегнетоэлектрика при уменьшении толщины кремниевой пластины до 20 мкм приводит к росту значения емкости структуры на плато вольт–фарадной характеристики в 1,7 раза и расширению петли гистерезиса на несколько Вольт. Наблюдаемое различие значений емкости на плато свидетельствует о неодинаковости контактов $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ с Si в случаях с тонкой и толстой подложками. Сдвиги вольт–фарадных характеристик по оси полевых напряжений, скорее всего, связаны с разными для случаев с толстой и тонкой подложками встроенными зарядами на границах раздела $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ — Si.

Ключевые слова: мембрана, структура металл–сегнетоэлектрик–полупроводник, высокочастотная вольт–фарадная характеристика

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–19–00493, <https://rscf.ru/project/22-19-00493/>

Для цитирования: Белорусов Д.А., Гольдман Е.И., Афанасьев М.С., Чучева Г.В. Высокочастотные вольт–фарадные характеристики мембранных структур на основе $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(3): 278—282. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202405.586>

© 2024 National University of Science and Technology “MISIS”.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

High-frequency C–V-characteristics of membrane structures based on $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$

D. A. Belorusov, E. I. Goldman, M. S. Afanasiev, G. V. Chucheva✉

*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics
of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch),
1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation*

✉ Corresponding author: gvc@ms.ire.rssi.ru

Abstract. The production of ferroelectric membrane-type structures was carried out in several sequential operations. First, wells were etched on a silicon (100) n-type plate with a thickness of 250 μm with a natural oxide on the surfaces in a hydrofluoric acid solution of 70 wt.% HF+30 wt.% H_2O and a membrane blank was obtained. The diameter of the recesses in the silicon wafer at the base was 1.2 mm. Then, a 300 nm $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ layer and contact electrodes were deposited on the flat surface of the membrane blank. The minimum thickness of the n-Si substrate was 20 μm . Comparative measurements of high-frequency C–V-characteristics of metal–ferroelectric–semiconductor objects grown on thin (20 μm) and thick (750 μm) substrates were carried out at room temperature. A change in capacitive properties of samples was found with a decrease in the thickness of the substrate on which they were formed. In objects grown on a thin substrate, compared with those formed on a thick one, branches of the C–V-characteristic are shifted towards negative voltages by 4 V and the width of the hysteresis loop is 3–4 V larger. A decrease in the "tightness" of the ferroelectric film with a decrease in the thickness of the silicon wafer to 20 microns leads to an increase in the capacitance value of the structure on the plateau of C–V-characteristics by 1.7 times and an expansion of the hysteresis loop by several volts. The observed difference in capacitance values on the plateau indicates that $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ contacts with Si are not the same in cases with thin and thick substrates. Shifts in C–V-characteristics along the field voltage axis are most likely associated with different embedded charges at the $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ –Si interface for cases with thick and thin substrates.

Keywords: membrane, metal–ferroelectric–semiconductor structure, high-frequency C–V-characteristic

Acknowledgements: The study was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation, No. 22–19–00493, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00493/>

For citation: Belorusov D.A., Goldman E.I., Afanasiev M.S., Chucheva G.V. High-frequency C–V-characteristics of membrane structures based on $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(3): 278–282. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202405.586>

Введение

Изучение сегнетоэлектриков продолжается с пятидесятих годов прошлого века, и их электрофизические свойства уже широко применяются во многих электронных устройствах [1–3]. К настоящему времени определилась перспектива использования так называемых мембран, т. е. свободных от подложки тонких сегнетоэлектрических пленок. Отсутствие соединенных с сегнетоэлектриком пластин существенно улучшает механические свойства сформированных на их основе структур. Мембраны не прижимаются к жесткой подложке и поэтому могут прогибаться и выдерживать гораздо большие механические нагрузки,

чем зажатые пленки. Кроме того, из-за отсутствия контакта с массивным материалом не возникает деформация, обусловленная несоответствием контактирующих кристаллических решеток, соответственно и снижается концентрация связанных с этим обстоятельством дислокаций. Имеет место свобода распространения деформации и поляризации по сегнетоэлектрику как в статическом, так и в динамическом режимах, что приводит к корреляции явлений, происходящих в различных пространственных точках мембраны [4, 5]. Данное свойство мембран позволяет с помощью внешней механической нагрузки управлять электрофизическими характеристиками структур, выращенных на сегнетоэлектрических слоях. Сообщается [6]

о высокой перестраиваемости пленки диэлектрика $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{TiO}_3$ при механическом изгибе — емкость конденсатора металл—изолятор—металл с изолирующим слоем $\text{Ba}_{0,5}\text{Sr}_{0,5}\text{TiO}_3$ изменяется более, чем в два раза.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию высокочастотных вольт—фарадных характеристик (**ВФХ**) структур металл—диэлектрик—полупроводник (**МДП**), выращенных на сегнетоэлектрическом слое $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ с резко уменьшенной (до 20 мкм) толщиной подложки. Выбор керамики $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ в качестве главного элемента объекта исследований обусловлен тем, что данный материал среди различных неорганических сегнетоэлектрических оксидов наиболее чувствителен к внешнему механическому напряжению. Именно поэтому тонкие пленки $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ являются перспективными кандидатами для применения в гибких электронных устройствах [6—8]. Далее будет описана процедура приготовления мембраны с МДП—структурами, и будут изложены условия измерений ВФХ этих объектов. Затем будут приведены и обсуждены результаты опытов, выполнено сравнение полученных данных с аналогами характеристик, свойственных структурам, выращенным на толстых подложках. В заключение формулируются основные выводы работы и обсуждаются планы ее развития.

Экспериментальная часть

Изготовление сегнетоэлектрических структур мембранного типа проводилось в несколько последовательных операций. Сначала на кремниевой (100) пластине *n*-типа проводимости с концентрацией легирования $N_d = 2,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, толщиной 250 нм и естественным окислом на поверхностях в растворе плавиковой кислоты состава 70 % (вес.) $\text{HF} + 30 \%$ (вес.) H_2O вытраивались лунки и получалась мембранная заготовка. Диаметр выемок в кремниевой пластине у основания составлял 1,2 мм, толщина оставшейся невытраивенной части пластины — 20 мкм. Затем в установке Плазма—50СЭ (Россия) путем высокочастотного распыления поликристаллической мишени в атмосфере кислорода на плоской поверхности кремневой мембран-

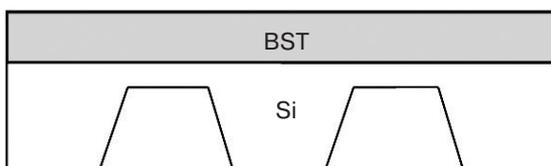


Рис. 1. Кремневая заготовка мембраны с нанесенным слоем сегнетоэлектрика

Fig. 1. Silicon membrane blank with a deposited ferroelectric layer

ной заготовки формировался слой $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ (BST) толщиной 300 нм (рис. 1).

Методом электронно—лучевого осаждения через теньевую маску на поверхность пленки BST наносилась решетка никелевых электродов с толщиной 100 нм, диаметром 185 мкм (площадь $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$) и расстоянием между центрами ближайших контактов 400 мкм. Последняя операция — на обратную к слою BST поверхность подложки осаждался сплошной никелевый электрод (тыловой контакт). Более детально конструкции установок и методики осаждения пленок описаны в [9, 10].

Для сравнительного анализа были проведены высокочастотные измерения ВФХ МДП мембранных объектов и выращенных на толстой (750 нм) подложке из кремния *n*-типа проводимости. У всех исследованных МДП—структур площади полевых электродов, состав и толщина сегнетоэлектрических изолирующих слоев были соответственно одинаковыми. Опыты выполнялись при комнатной температуре на частоте 1 МГц со скоростью динамической развертки полевого напряжения V_g — 33 мВ/с. Использовался прецизионный измеритель LCR Agilent E4980A, экспериментальные результаты показаны на рис. 2 и 3.

Результаты и их обсуждение

Оказалось, что значения емкости *C* на верхнем и нижнем плато ВФХ (см. рис. 2 и 3) МДП—структур, сформированных на тонкой и толстой подложках, заметно различаются.

Из рис. 2 и 3 видно, что у выращенных на тонкой подложке объектов, по сравнению со сформированными на толстой, ветви ВФХ сдвинуты в сторону отрицательных напряжений на 4 В, и ширина петли гистерезиса на 3÷4 В больше. Известно [11, 12], что в области плато ВФХ величина емкости МДП—структур определяется параметрами полупроводника, отвечающими пиннингу уровня Ферми на электронных ловушках с высокой концентрацией и U-ной формой спектра, расположенных в буферном слое между сегнетоэлектриком и кремнием. Наблюдаемое различие значений *C* на плато свидетельствует о неодинаковости контактов BST с Si в случаях с тонкой и толстой подложками. По-видимому, неконтролируемые условия образования естественного окисла на поверхностях кремния не позволяют считать одинаковыми параметры оборванных связей, являющихся основой электронных ловушек, на разных границах пластин Si. Сдвиги ВФХ по оси полевых напряжений, скорее всего, связаны с разными для случаев с толстой и тонкой подложками встроенными зарядами на границах раздела BST—Si. Большая у мембранных МДП—структур, ширина гистерезиса ветвей ВФХ фактически подтверждает тезис, высказанный

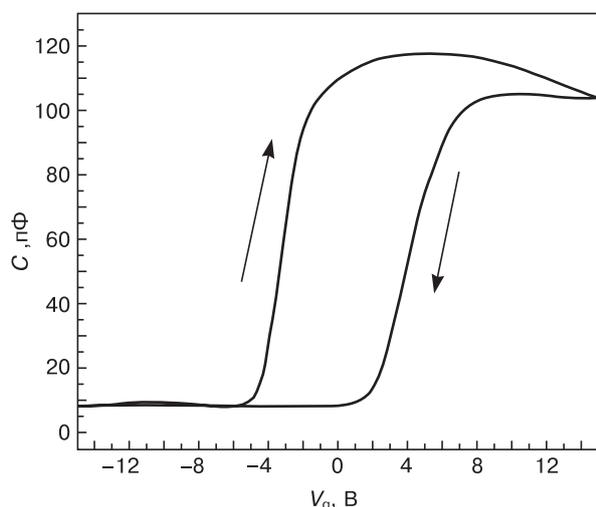


Рис. 2. Высокочастотная вольт–фарадная характеристика мембранной МДП–структуры. Из–за опасений повреждения образца измерения прекращались практически сразу после слияния ветвей ВФХ и их выхода на верхнее плато. Стрелки на ветвях указывают направления изменения напряжения со временем

Fig. 2. High–frequency capacitance–voltage characteristic of the membrane MIS structure. Due to concerns about sample damage, measurements were stopped almost immediately after the branches of the C–V characteristic merged and reached the upper plateau. Arrows on the branches indicate the directions of voltage change over time

ранее [6], о создаваемой толстой подложкой «зажатости» пленки сегнетоэлектрика.

Следует отметить, что уверенно наблюдаемое изменение характеристик МДП–структур при значительном снижении толщины подложки обнаружено в образцах, далеких по геометрическим параметрам от идеальных мембран: сохранившаяся после травления часть кремниевой подложки более, чем в 66 раз толще пленки сегнетоэлектрика. Тем не менее, фиксируемый рост значений емкости МДП–объектов на верхнем плато в 1,7 раза, расширение петли гистерезиса на несколько Вольт говорят о силе эффекта снятия «зажатости» с сегнетоэлектрика. Поэтому представляется важным вопрос о проведении измерений ВФХ на образцах с существенно более тонкой, чем 20 мкм, подложкой. Другое направление развития тематики сегнетоэлектрических мембран — это расширение исследова-

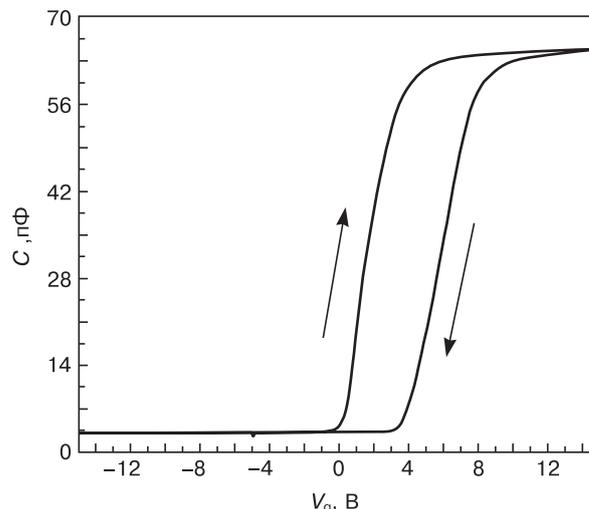


Рис. 3. Высокочастотная вольт–фарадная характеристика МДП–структуры, сформированной на толстой подложке. Стрелки на ветвях указывают направления изменения напряжения со временем

Fig. 3. High–frequency capacitance–voltage characteristic of the MIS structure formed on a thick substrate. Arrows on the branches indicate the directions of voltage change over time

ований на широкий температурный диапазон от комнатной до 200 °С. Также представляют интерес работы по изучению эффектов запаздывания, которые проявляются в переходных процессах после ступенчатого изменения полевого напряжения.

Заключение

Исследовано изменение емкостных свойств объектов металл–сегнетоэлектрик–полупроводник с уменьшением толщины подложки, на которой они сформированы.

Снижение «зажатости» пленки сегнетоэлектрика при уменьшении толщины кремниевой подложки до 20 мкм приводит к росту значения емкости структуры на плато вольт–фарадной характеристики в 1,7 раза и расширению петли гистерезиса на несколько вольт.

Библиографический список / References

1. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства. М.: Энергоатомиздат; 2011. 175 с.
Vorotilov K.A., Mukhortov V.M., Sigov A.S. the integrated ferroelectric devices. Moscow: Energoatomizdat; 2011. 175 p. (In Russ.)
2. Park J.Y., Yang K., Lee D.H., Kim S.H., Lee Y., Reddy P.R.S., Jones J.L., Park M.H. A perspective on semiconductor devices based on fluoride–structured ferroelectrics from the materials–device integration perspective. *Journal of Applied Physics*. 2020; 128(24): 240904. <https://doi.org/10.1063/5.0035542>
3. Wang B., Huang W., Chi L., Al–Hashimi M., Marks T.J., Facchetti A. High–*k* gate dielectrics for emerging flexible and stretchable electronics. *Chemical Reviews*. 2018; 118(11): 5690–5754. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00045>
4. Du D., Hu J., Kawasaki J.K. Strain and strain gradient engineering in membranes of quantum materials featured. *Applied Physics Letters*. 2023; 122(17): 170501. <https://doi.org/10.1063/5.0146553>
5. Zhang K., Ren Y., Cao Y. Mechanically tunable elastic modulus of freestanding Ba_{1–x}Sr_xTiO₃ membranes

via phase-field simulation. *Applied Physics Letters*. 2022; 121(15): 152902. <https://doi.org/10.1063/5.0099772>

6. Ko D.L., Tsai M.F., Chen J.W., Shao P.W., Tan Y.Z., Wang J.J., Ho S.Z., Lai Y.H., Chueh Y.L., Chen Y.C., Tsai D.P., Chen L-Q., Chu Y.H. Mechanically controllable nonlinear dielectrics. *Science Advances*. 2020; 6(10): eaaz3180. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz3180>

7. Xu R., Huang J., Barnard E.S., Hong S.S., Singh P., Wong E.K., Jansen T., Harbola V., Xiao J., Wang B.Y., Crossley S., Lu D., Liu S., Hwang H.Y. Strain-induced room-temperature ferroelectricity in SrTiO₃ membranes. *Nature Communications*. 2020; 11: 3141. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16912-3>

8. Wang B., Lu H., Bark C.W., Eom C-B., Gruverman A., Chen L-Q. Mechanically induced ferroelectric switching in BaTiO₃ thin films. *Acta Materialia*. 2020; 193: 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.032>

9. Иванов М.С., Афанасьев М.С. Особенности формирования тонких сегнетоэлектрических пленок Ba_xSr_{1-x}TiO₃ на различных подложках методом высокочастотного распыления. *Физика твердого тела*. 2009; 51(7): 1259–1262.

Ivanov M.S., Afanas'ev M.S. Specific features of the formation of Ba_xSr_{1-x}TiO₃ ferroelectric thin films on differ-

ent substrates by radio-frequency sputtering. *Physics of the Solid State*. 2009; 51(7): 1328–1331. <https://doi.org/10.1134/S1063783409070026>

10. Киселев Д.А., Афанасьев М.С., Левашов С.А., Чучева Г.В. Кинетика роста индуцированных доменов в сегнетоэлектрических тонких пленках Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO₃. *Физика твердого тела*. 2015; 57(6): 1134–1137.

Kiselev D.A., Afanasiev M.S., Levashov S.A., Chucheva G.V. Growth kinetics of induced domains in Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO₃ ferroelectric thin films. *Physics of the Solid State*. 2015; 57(6): 1151–1154. <https://doi.org/10.1134/S1063783415060189>

11. Goldman E.I., Chucheva G.V., Belorусov D.A. On the form of high-frequency voltage-capacitance characteristics of metal-insulator-semiconductor structures with a ferroelectric insulating layer Ba_xSr_{1-x}TiO₃. *Ceramics International*. 2021; 47(15): 21248–21252. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.129>

12. Goldman E.I., Chucheva G.V., Belorусov D.A. The role of a buffer layer at the contact with silicon in structures with an insulating gap made of a material replacing SiO₂. *Ceramics International*. 2024; 50(6): 9678–9681. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.12.286>

Информация об авторах / Information about the authors

Белорусов Дмитрий Александрович — научный сотрудник, лаборатория № 251, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (фрязинский филиал), пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Гольдман Евгений Иосифович — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория № 251, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (фрязинский филиал), пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Афанасьев Михаил Сергеевич — доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория № 251, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (фрязинский филиал), пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-8616>; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Чучева Галина Викторовна — доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории № 251, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (фрязинский филиал), пл. Введенского, д. 1, Фрязино, Московская обл., 141120, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-1857>; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Dmitry A. Belorусov — Researcher, Laboratory No. 251, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), 1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Evgeniy I. Goldman — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Laboratory No. 251, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), 1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Mikhail S. Afanasyev — Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory No. 251, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), 1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-8616>; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Galina V. Chucheva — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Head of the Laboratory No. 251, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), 1 Vvedenskogo Sq., Fryazino, Moscow Region 141120, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-1857>; e-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 27.04.2024; поступила после доработки 02.09.2024; принята к публикации 06.10.2024

Received 27 April 2024; Revised 2 September 2024; Accepted 6 October 2024

* * *