



Получено: 25.01.2023 г. | Принято: 27.01.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.70.79>

Научная статья

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР ПРИ ПОСТРОЕНИИ GaN НОРМАЛЬНО-ЗАКРЫТЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ СИЛОВЫХ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

К.А.Царик<sup>1</sup>, к.т.н., нач. лаб., ORCID: 0000-0002-8218-7774

О.Б.Чуканова<sup>1</sup>, инженер, ORCID: 0000-0001-5726-630X / [kukhtuaeva@mail.ru](mailto:kukhtuaeva@mail.ru)

Е.А.Козловская<sup>1</sup>, инженер, ORCID: 0000-0003-0235-3101

**Аннотация.** В статье рассмотрены ключевые зависимости характеристик нормально-закрытых транзисторов от параметров GaN гетероструктур. Определены толщины и концентрации легирующих примесей в слоях гетероструктуры. В результате моделирования получены вольтамперные характеристики р-канального полевого транзистора и п-канального транзистора с подзатворным слоем р-типа.

**Ключевые слова:** нормально-закрытые транзисторы, монокристаллические интегральные схемы, гетероструктуры

**Для цитирования:** К.А. Царик, О.Б. Чуканова, Е.А. Козловская. Особенности конструкции гетероструктур при построении GaN нормально-закрытых транзисторов для силовых монокристаллических интегральных схем. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 1. С. 70–79. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.70.79>

Received: 25.01.2023 | Accepted: 27.01.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.70.79>

Original paper

## DESIGN FEATURES OF HETEROSTRUCTURES FOR CONSTRUCTION OF GaN NORMALLY-OFF TRANSISTORS FOR POWER MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUITS

К.А. Tsarik<sup>1</sup>, Cand. of Sci. (Tech), Head of Laboratory, ORCID: 0000-0002-8218-7774

О.В. Chukanova<sup>1</sup>, Engineer, ORCID: 0000-0001-5726-630X / [kukhtuaeva@mail.ru](mailto:kukhtuaeva@mail.ru)

Е.А. Kozlovskaya<sup>1</sup>, Engineer, ORCID: 0000-0003-0235-3101

**Abstract.** This paper considers the key dependencies of characteristics of the normally-off transistors on GaN heterostructures parameters. Thicknesses and concentrations of dopants in the layers of the heterostructure are determined. As a result of the simulation, the current-voltage characteristics of a p-channel field-effect transistor and an n-channel transistor with a p-type gate layer were obtained.

**Keywords:** normally-off transistors, monolithic integrated circuits, heterostructures

**For citation:** K. A. Tsarik, O. B. Chukanova, E. A. Kozlovskaya. Design features of heterostructures for construction of GaN normally-off transistors for power monolithic integrated circuits. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 1. PP. 70–79. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.1.70.79>.

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", Москва, Россия / National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia



## ВВЕДЕНИЕ

Нитрид галлия (GaN) и родственные полупроводниковые сплавы (такие как AlGaN, InGaN и т.д.) неоднократно упоминались как перспективные материалы для следующего поколения мощных и высокочастотных электронных устройств. Стандартно GaN/AlGaN транзисторы нормально-открытые. Для силовых применений требуются нормально-закрытые приборы, чтобы гарантировать безопасную работу и простую конфигурацию управления затвором. Создание монолитной схемы на основе таких приборов позволит создавать комплиментарные пары и логические схемы, расширит электронную компонентную базу России.

Для создания нормально-закрытых транзисторов необходимо обеспечить отсутствие носителей зарядов в канале транзистора под затвором при нулевых напряжениях на нем. Для этого необходимо создать конструкцию гетероструктуры, позволяющей обеспечить точный контроль порогового напряжения и изменить его в сторону положительных значений. Пороговое напряжение зависит от высоты барьера Шоттки, разрыва зоны проводимости в гетеропереходе AlGaN/GaN, толщины барьера  $d_{\text{AlGaN}}$ , доли Al в AlGaN, концентрации донорной примеси в AlGaN, диэлектрической проницаемости барьерного слоя, а также плотности поляризационного заряда [1].

В течение многих лет было предложено несколько решений для достижения нормально выключенного режима работы: имплантация ионов фтора под затвор [2], углубление затвора и использование структуры MIS (metal-insulator-semiconductor) [3], каскадное соединение нормально-открытого и МОП-транзистора [4] и использование p-GaN слоя под затвором [2].

При имплантации ионов фтора отрицательный заряд ионов способствует истощению канала и приводит к положительному пороговому напряжению  $V_{\text{th}}$ . В недавних работах [5] было показано, что F-ионы могут проявлять нестабильность при высоком электрическом напряжении, что приводит к изменению порогового напряжения, к увеличению токов утечек, уменьшению подвижности. Чтобы частично уменьшить этот недостаток, плазменное травление в индуктивно связанной плазме (ICP) проводится с использованием очень низкой мощности.

Использование структуры с затвором типа MIS с заглублением в AlGaN барьер гарантирует эффективную минимизацию утечки затвора и пороговое напряжение выше одного вольта. Основными недостатками этого подхода являются нестабильность порогового напряжения из-за ловушек

## INTRODUCTION

Gallium nitride (GaN) and related semiconductor alloys (such as AlGaN, InGaN, etc.) have repeatedly been mentioned as promising materials for the next generation of high-power and high-frequency electronic devices. As standard, GaN/AlGaN transistors are normally-on. Power applications require normally-off devices to ensure safe operation and a simple gate control configuration. Creating a monolithic circuit based on such devices will enable complementary pairing and logic circuits, and will expand the electronic component base in Russia.

In order to design normally-off transistors it is necessary to ensure that there are no charge carriers in the transistor channel below the gate at zero voltages across such transistors. For this purpose, a heterostructure must be designed to allow precise control of the threshold voltage and to change it towards positive values. Threshold voltage depends on Schottky barrier height, conduction band gap in AlGaN/GaN heterojunction,  $d_{\text{AlGaN}}$  barrier thickness, Al share in AlGaN, concentration of donor impurity in AlGaN, dielectric permittivity of barrier layer, and polarization charge density [1].

Over the years, several solutions have been proposed to achieve normally-off operation: implanting fluorine ions under the gate [2], deepening the gate and using a metal-insulator-semiconductor (MIS) structure [3], cascode connection of the normally-on and MOSFET [4] and using the p-GaN layer under the gate [2].

When fluorine ions are implanted, negative charge of the ions contributes to depletion of the channel and leads to a positive threshold voltage  $V_{\text{th}}$ . In recent work [5] it has been shown that F-ions can exhibit instability at high electrical voltages, leading to changes in threshold voltage, increased leakage currents and reduced mobility. In order to partly reduce this disadvantage, plasma etching in inductively coupled plasma (ICP) is carried out using very low power.

The use of a gate-type MIS structure buried in an AlGaN barrier ensures that gate leakage is effectively minimised and the threshold voltage is above one volt. The main drawbacks of this approach are instability of the threshold voltage due to traps in dielectrics and the time-dependent dielectric breakdown of the thin insulator layer [6]. Therefore, in such transistors it is important to select the correct type of material for sub-gate dielectric.

In cascode connection of a normally-on high voltage GaN transistor and a low voltage silicon MOS transistor, the latter controls the on/off state of the pair, while the GaN HEMT (which has high field stability) holds voltage in the off-state. The advantages of this solution are the very good threshold voltage stability, ability to use standard Si drivers, and the use of



в диэлектрике, а также зависящий от времени пробой диэлектрика тонкого изолятора [6]. Поэтому в таких транзисторах важно подобрать правильно подзатворный диэлектрик.

При каскодном соединении нормально-открытого высоковольтного GaN-транзистора и низковольтного кремниевого МОП-транзистора последний управляет состоянием включения/выключения пары, в то время как GaN НЕМТ (обладающий высокой устойчивостью к высоким полям) удерживает напряжение в выключенном состоянии. Преимуществами этого решения являются очень хорошая стабильность порогового напряжения, возможность использования стандартных Si драйверов, а также использование нормально включенного НЕМТ, процесс изготовления и надежность которого хорошо оценены. С другой стороны, сложность каскодного соединения является основным недостатком.

Слой p-GaN типа поднимает зонную диаграмму гетероструктуры, что приводит к полному истощению двумерного электронного газа (2DEG) при нулевом смещении на затворе. Специфическими проблемами транзисторов с p-GaN затвором являются зависящая от времени деградация и эффекты захвата, связанные с акцепторной примесью в виде Mg. В качестве полупроводника под затвором может быть выбран оксид никеля (NiO) – перспективный изоляционный материал для GaN устройств, благодаря широкой запрещенной зоне (4 эВ) и относительно высокой диэлектрической проницаемости 11,9 (т.е. почти в три раза выше, чем у обычно используемого SiO<sub>2</sub>). Важным аспектом, связанным с NiO, является возможность настройки его электронных свойств путем изменения условий роста материала. Фактически, при определенных условиях полупроводящие слои NiO p-типа могут быть получены и использованы для формирования нормально-закрытых GaN НЕМТ, но контролировать некоторые технологические этапы достаточно трудно, что может повлиять на свойства 2DEG [7].

На основе гетероструктур с p-GaN слоем формируют так называемые платформы, которые включают в себя различные типа приборов: нормально-открытые GaN транзисторы, нормально-закрытые p-канальные и нормально-закрытые r-канальные приборы [8]. Данные платформы позволяют сократить и упростить сборку схем, а также создавать комплиментарные пары на основе GaN структур.

Таким образом, в данной работе используется физическое моделирование для исследования поведения зонной структуры при варьировании параметров барьерного слоя и слоя спейсера. Исследовано поведение характеристик нормально-закрытого транзистора на основе GaN структуры при различных значениях толщины барьерного слоя.

a normally-on HEMT whose fabrication process and reliability are well known. On the other hand, complexity of the cascode connection presents the major disadvantage.

The p-GaN type layer lifts the band diagram of the heterostructure resulting in complete depletion of two-dimensional electron gas (2DEG) at zero gate bias. Specific problems of p-GaN-gate transistors are the time-dependent degradation and trapping effects related to acceptor impurity in the form of NiO, a promising insulating material for GaN devices due to its wide bandgap (4 eV) and relatively high dielectric constant of 11.9 (i.e., almost three times higher than that of the commonly used SiO<sub>2</sub>), can be selected as a semiconductor under the gate. An important aspect related to NiO is the possibility to tune its electronic properties by changing the growth conditions of the material. In fact, under certain conditions, NiO p-type semiconducting layers can be obtained and used to form normally closed GaN HEMT, but it is quite difficult to control some of the process steps, which can affect 2DEG properties [7].

On the basis of heterostructures with p-GaN layer the so-called platforms are formed which include different types of devices: normally-on GaN transistors, normally-off n-channel and normally-off p-channel devices [8]. These platforms allow of reducing and simplifying circuit assembly, as well as design complementary pairs based on GaN structures.

Thus, in this paper physical modelling is used to study behaviour of the band structure by varying the barrier layer and spacer layer parameters. The behaviour of characteristics of a GaN-based normal-closed transistor at different values of the barrier layer thickness has been studied. A possibility of normally-off p-channel formation or normally-on GaN transistors with variation of p-GaN layer parameters is also studied.

## RESEARCH METHODS

The study was carried out using simulation in Sentaurus TCAD (Technology Computer Aided Design) software package. This software is developed for semiconductor modelling and allows of simulating both the fabrication and behaviour of semiconductor devices. TCAD uses Newton's method for solving Poisson's equations, continuity equations, etc. These equations provide necessary information to determine specific physical parameters of the device. Sentaurus TCAD also takes the GaN piezoelectric polarisation physics into account. Another advantage of Sentaurus TCAD is that its library of provided semiconductor devices includes a HEMT structure which can be used as a reference when modelling transistors.



А также исследована возможность формирования р-канального нормально-закрытого или нормально-открытого GaN транзистора при изменении параметров р-GaN слоя.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось при помощи моделирования в программном пакете Sentaurus TCAD (Technology Computer Aided Design). Данное программное обеспечение предназначено для моделирования полупроводников, позволяет моделировать как изготовление, так и поведение полупроводниковых приборов. При моделировании в TCAD используется метод Ньютона для решения уравнения Пуассона, уравнений непрерывности и др. Эти уравнения предоставляют необходимую информацию для определения конкретных физических параметров устройства. Sentaurus TCAD также учитывает физику GaN пьезоэлектрической поляризации. Другим преимуществом Sentaurus TCAD является то, что в его библиотеке предоставленных полупроводниковых приборов имеется структура НЕМТ, которую можно использовать как ориентир при моделировании транзисторов.

Наличие пьезоэлектрической поляризации приводит к возникновению интерфейсного заряда. Величина плотности интерфейсного заряда  $\sigma$  определяется разностью поляризаций контактирующих веществ. Для гетероструктур AlGaN/GaN величина заряда  $\sigma$  может быть вычислена с использованием упругих постоянных GaN, AlN и правила Вегарда для твердого раствора  $Al_xGa_{1-x}N$ . Знак заряда  $\sigma$  зависит от типа поверхности раздела: Ga-face, когда слой GaN заканчивается атомом галлия и N-face – атомом азота.

При расчете в пакете TCAD можно пользоваться методикой учета интерфейсного заряда с учетом простейшей классической диффузионно-дрейфовой модели, а можно использовать уже встроенные поляризационные пакеты, учитывающие как спонтанную, так и пьезоэлектрическую поляризации. Наличие поляризационного заряда на поверхности GaN между электродами, осложняет работу приборов, поэтому используют различные пассивирующие слои, которые также можно промоделировать в Sentaurus TCAD.

В структурах GaN/AlGaN можно получить значение слоевой концентрации до  $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . На самом деле, это не так. С ростом мольной доли Al в барьерном слое увеличивается несоответствие решеток, что приводит к релаксации напряжений и образованию дислокаций в барьерном слое и понижает подвижность  $m$ . В реальности выращивают структуры с мольной долей Al  $x < 0.3$  и концентрацией  $N_s$  порядка  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

The presence of piezoelectric polarisation leads to an interface charge. The value of the interface charge density  $\sigma$  is determined by polarisation difference of the contacting substances. For AlGaN/GaN heterostructures, the magnitude of the charge  $\sigma$  can be calculated using the elastic constants GaN, AlN and Vegard's rule for the solid solution  $Al_xGa_{1-x}N$ . The sign of the charge  $\sigma$  depends on the interface type: Ga-face when the GaN layer ends with a gallium atom, and N-face with a nitrogen atom.

For TCAD calculations, one can use the interface charge accounting technique with the simplest classical diffusion-drift model, or one can use the built-in polarisation packages that take into account both spontaneous and piezoelectric polarisation. The presence of polarisation charge on the GaN surface between the electrodes complicates the operation of devices, so various passivation layers are used, which can also be modelled in Sentaurus TCAD.

In GaN/AlGaN structures it is possible to obtain layer concentration values up to  $6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . In fact, this is not the case. As the Al mole fraction in the barrier layer increases, the lattice mismatch increases, leading to stress relaxation and formation of dislocations in the barrier layer and reducing mobility  $m$ . In reality, the structures with Al mole fraction  $x < 0.3$  and  $N_s$  concentration about  $1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  are grown.

Thus, the barrier layer parameters have a significant influence on device type, threshold voltage and output characteristics. It is therefore important to consider in detail the effect of the parameters of this layer specifically on our structure.

For modelling purposes a structure was used which contained the following layers: p-GaN 50 nm thick, AlGaN with Al 20% mole fraction of 9 nm, GaN channel layer, AlGaN buffer with Al 5% mole fraction, AlN nucleation layer, and substrate (Fig.1). The device design was chosen as follows: gate length 1  $\mu\text{m}$ , drain-gate distance 6  $\mu\text{m}$  and source-gate distance 1  $\mu\text{m}$ .

To calculate the concentration in the channel a quantum mechanical problem has to be solved but, as shown in [9], the same result is obtained if we limit ourselves to using the simplest classical diffusion-drift model. At zero offsets at the gate, a band diagram of the structure (Fig.2) and distribution of charge carrier density depending on the barrier layer thickness, mole fraction of aluminium in it were constructed, and influence of p-GaN layer parameters on transistor characteristics and the influence of AlN layer thickness were studied.

### RESULTS AND DISCUSSION

By varying the barrier layer thickness and mole fraction of aluminium in it and by measuring the carrier concentration in the channel, an evaluation curve of

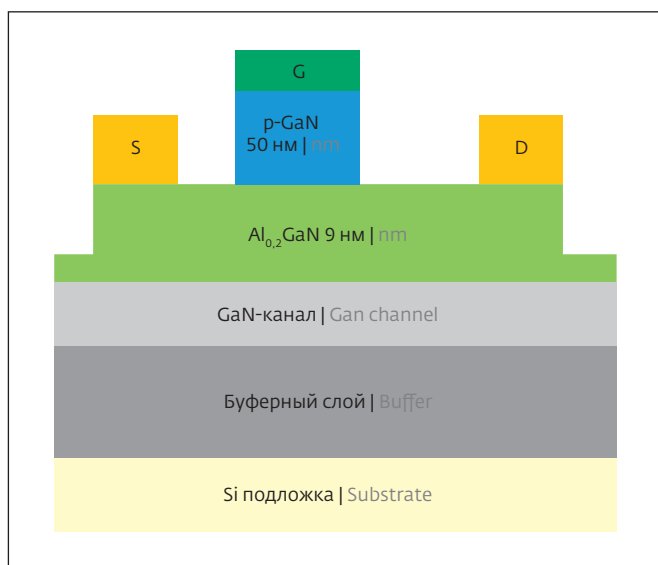


Рис.1. Схематичное изображение рассматриваемого транзистора

Fig.1. Schematic image of the considered transistor

Таким образом, существенное влияние на тип прибора, пороговое напряжение и выходные характеристики оказывают параметры барьерного слоя. Поэтому важно подробно рассмотреть влияние параметров этого слоя конкретно на нашу структуру.

Для моделирования в качестве основы была взята структура, которая содержала следующие слои: p-GaN толщиной 50 нм, AlGa<sub>0.2</sub>N с мольной долей Al 20% 9 нм, каналный слой GaN, буфер AlGa<sub>0.05</sub>N с мольной долей Al 5%, зародышевый слой AlN, подложка (Рис.1). Конструкция прибора была выбрана следующей: длина затвора 1 мкм, расстояние сток-затвор 6 мкм и расстояние исток-затвор 1 мкм.

Для расчета концентрации в канале необходимо решить квантово-механическую задачу, но, как показано в [9], такой же результат получается, если ограничиться использованием простейшей классической диффузионно-дрейфовой модели. При нулевых смещениях на затворе строилась зонная диаграмма структуры (Рис.2.) и распределение плотности носителей заряда в зависимости от толщины барьерного слоя, мольной доли алюминия в нем, а также исследовалось влияние параметров p-GaN слоя на характеристики транзистора и влияние толщины AlN слоя.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поварьировав толщину барьерного слоя и мольной доли алюминия в нем и измерив концентрацию носителей в канале, была построена оценочная кривая типа прибора (Рис.3). Если структура имеет параметры барьерного слоя в области I, то прибор

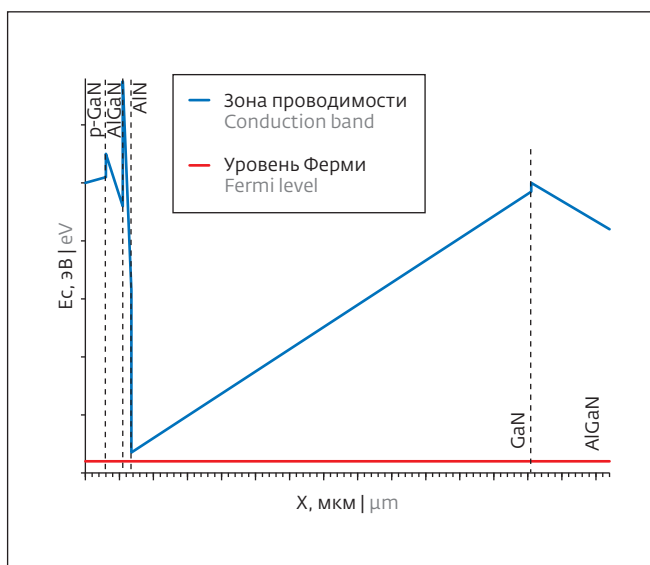


Рис.2. Дно зоны проводимости и уровень Ферми в рассматриваемой структуре в области под затвором

Fig.2. Conduction band bottom and Fermi level in the structure in the field under the gate

the device type was constructed (Fig.3). If the structure has the barrier layer parameters in region I, the device is normally-on, while if it has parameters in region II, it is normally-off. It is necessary to take values of parameters closer to y-axis, i.e. with thickness less than 20 nm and mole fraction of Al more than 20 % to make a device with decent drain currents, though for power applications it is not the most important parameter of a transistor. In our case, a barrier layer thickness of 15 nm and an Al content of 23% were chosen.

It is also important to consider how exactly the barrier layer parameters affect the main characteristics of the transistor – the threshold voltage and drain current in the open state. The threshold voltage of a normally-off device must be positive, and, following the publications of foreign scientists – more than 1 V [10]. Fig.4 and Fig.5 show the dependences of transistor drain current at 3.5 V at the gate and threshold voltage on the barrier layer thickness and dependence of transistor drain current at 3.5V at the gate and threshold voltage on mole fraction of Al in it. Thus, the optimal barrier parameters to form a normally-off p-GaN gate transistor are 15 nm thickness and 23% mole fraction of Al in the barrier layer. Then the drain current at 3.5 V at the gate will be about 350 mA/mm and threshold voltage is about 1.5 V.

The other important parameter is the AlN layer thickness. In order to deplete the channel at zero bias with electrodes, the barrier layer thickness must be small enough, as already shown. The presence of an

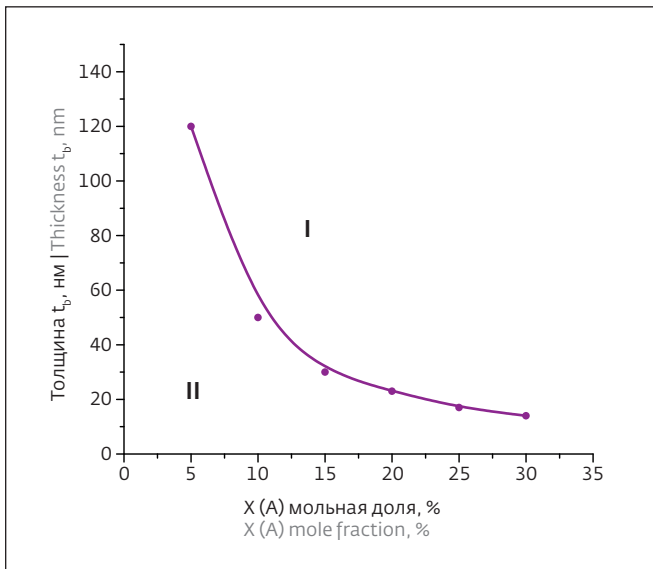


Рис.3. Влияние параметров барьерного слоя – толщины барьерного слоя  $t_b$  thickness и мольной доли Al  $x(\text{Al})$  mole fraction – на тип прибора.

Fig.3. Influence of barrier layer parameters – barrier layer thickness  $t_b$  thickness and Al mole fraction  $x(\text{Al})$  mole fraction – on device type.

нормально-открытый, а если с параметрами в области II – нормально-закрытый. Следует брать значения параметров ближе к оси  $y$ , т.е. со значениями толщины меньше 20 нм и мольной доле Al более 20%, чтобы прибор обладал приличными токами стока, хотя для силовых применений это не самый важный параметр транзистора. Для нашего случая была выбрана толщина барьерного слоя 15 нм и содержание Al в нем 23%.

Важно также рассмотреть, как именно параметры барьерного слоя влияют на основные характеристики транзистора – пороговое напряжение и ток стока в открытом состоянии. Пороговое напряжение нормально-закрытого прибора должно быть положительным, а если равняться на публикации зарубежных ученых – более 1 В [10]. На рис.4 и рис.5. показаны зависимости тока стока транзистора при 3,5 В на затворе и порогового напряжения от толщины барьерного слоя и зависимости тока стока транзистора при 3,5 В на затворе и порогового напряжения от мольной доли Al в нем. Таким образом, оптимальными параметрами барьера для формирования нормально-закрытого транзистора с p-GaN затвором являются 15 нм толщина и 23% мольная доля Al в барьерном слое. Тогда ток стока при 3,5 В на затворе будет приблизительно 350 мА/мм, а пороговое напряжение около 1,5 В.

Другим важным параметром является толщина слоя AlN. Для обеднения канала при нулевых

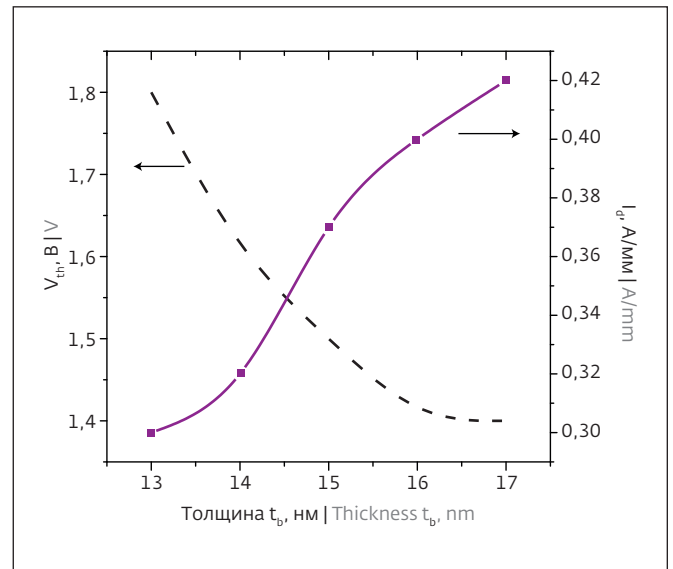


Рис.4. Зависимость тока стока транзистора  $I_d$  при 3,5 В на затворе (сплошная линия, правая ось  $y$ ) и зависимость порогового напряжения  $V_{th}$  (прерывистая, левая ось  $y$ ) от толщины барьерного слоя  $t_b$

Fig.4. Dependence of the transistor drain current  $I_d$  at 3,5 V on the gate (solid line, right y-axis) and dependence of the threshold voltage  $V_{th}$  (dashed, left y-axis) on the barrier layer thickness  $t_b$

AlN spacer layer increases the effective barrier thickness inversely, so its thickness should be chosen as small as possible. The critical thickness of the spacer layer has been estimated using the methodology described above. The thickness of this layer should not be more than 1.5 nm (Fig.6). When the thickness of AlN increases higher than 1.5 nm, concentration of electrons in the GaN layer will start to increase sharply.

The influence of the p-GaN layer on the device characteristics was also investigated. Based on the dependence of charge carriers concentration in the channel on p-layer, its critical thickness of 40 nm was found. At greater layer thickness the device is normally-off and layer thickness has no effect on their characteristics. Similarly, the critical degree of doping –  $4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  has been revealed from dependence of charge carriers concentration in the channel on p-layer impurity concentration. To obtain the normally-off state, the doping of the p-layer must be greater than this value. In practice, however, this parameter is poorly controlled. As a rule, concentration of the introduced impurity is known and what percentage of it is activated during growth is unknown.

A normally-off p-channel field effect transistor can also be formed on a single wafer in a single process cycle on the described heterostructure. It will

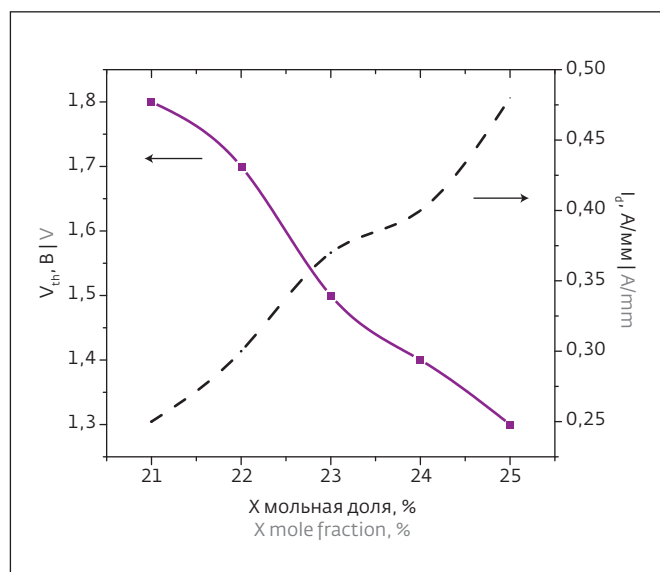


Рис.5. Зависимость тока стока транзистора  $I_d$  при 3,5 В на затворе (сплошная линия, правая ось  $y$ ) и зависимость порогового напряжения  $V_{th}$  (прерывистая, левая ось  $y$ ) от мольной доли Al в барьерном слое  $t_b$

Fig.5. Dependence of the transistor drain current  $I_d$  at 3,5 V on the gate (solid line, right  $y$  axis) and dependence of the threshold voltage  $V_{th}$  (dashed, left  $y$  axis) on the mole fraction of Al in the barrier layer  $t_b$

смещениях на электродах толщина барьерного слоя должна быть достаточно малой, как уже было показано. Наличие слоя спейсера AlN увеличивает эффективную толщину барьера обратно пропорционально, поэтому его толщину нужно выбирать как можно меньше. Оценка критической толщины слоя спейсера проводилась по описанной выше методике. Толщина этого слоя не должна быть более 1,5 нм (рис.6). При увеличении толщины AlN от 1,5 нм и выше концентрация электронов в слое GaN начнет резко увеличиваться.

Также было исследовано влияние p-GaN слоя на характеристики прибора. По зависимости концентрации носителей заряда в канале от толщины p-слоя была выявлена его критическая толщина – 40 нм. При большей толщине слоя прибор нормально-закрытый, а толщина слоя никак не влияет на характеристики. Аналогично по зависимости концентрации носителей заряда в канале от концентрации примеси в p-слое была выявлена критическая степень легирования –  $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Для получения нормально-закрытого состояния необходимо легирование p-слое больше этого значения. Однако на практике данный параметр плохо контролируется. Как правило, известна концентрация введенной примеси, а какой процент ее активируется при росте неизвестно.

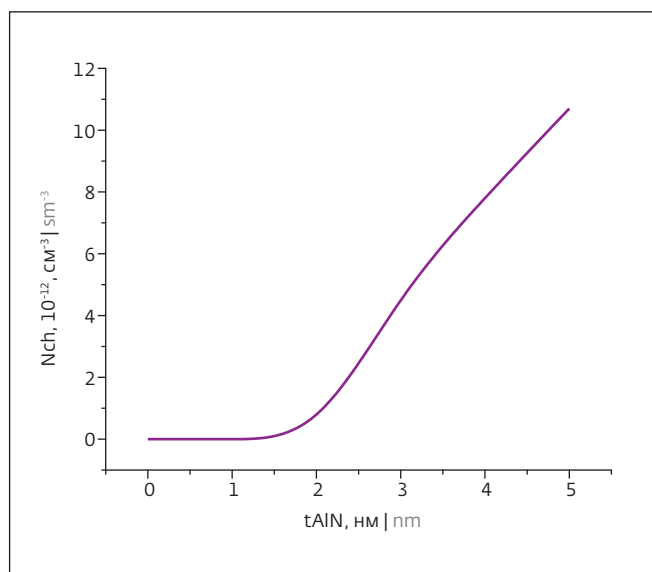


Рис.6. Зависимость концентрации носителей в канале от толщины слоя спейсера AlN

Fig.6. Dependence of the carrier concentration in the channel on the thickness of the AlN spacer layer

enable to form GaN-based complementary pairs, create different types of devices in a single process cycle, which will simplify circuit assembly. To form a p-channel transistor,  $n^+$ -GaN must be built up under the gate to ensure normally-off device behaviour (Fig.7).

For a normally-off p-channel transistor a device type evaluation method was also developed (Fig.8). The main parameters are channel layer parameters – Mg impurity concentration and p-layer thickness in this case. Similarly, if the structure has p-layer parameters in the I region, the transistor is normal-open. To create a universal platform when selecting parameters for p-channel transistor it is necessary to take into account parameters of n-channel transistor so that it too is normally-off (region III in Fig.8).

Thus, the following composition of heterostructure for the investigated platform was chosen: p-GaN with thickness 80 nm, AlGaIn with mole fraction Al 23% 15 nm, GaN channel layers, AlGaIn buffer with mole fraction Al 5%, AlN nucleation layer, and substrate. Figure 9 shows the calculated volt-current characteristics for these devices. A normally-off p-channel field effect transistor with gate length, drain-gate and source-gate of 1  $\mu\text{m}$  each has a drain current at -3 V on the gate of the order of -0.9 mA/mm. By varying topology of the device, varying the length and width, it will be possible to achieve similar levels of current to create a complementary pair.

На одной пластине в едином технологическом цикле на описанной гетероструктуре также можно сформировать и нормально-закрытый р-канальный полевой транзистор. Это даст возможность формировать комплементарные пары на основе GaN, создавать различные типы приборов за один технологический цикл, что упростит сборку схем. Для формирования р-канального транзистора необходимо нарастить  $p^+$ -GaN под затвором для обеспечения нормально-закрытого поведения прибора (рис.7).

Для нормально-закрытого р-канального транзистора также была разработана методика оценки типа прибора (рис.8). Основными параметрами являются параметры канального слоя – концентрация примеси Mg и толщина р-слоя в данном случае. Аналогично, если структура имеет параметры р-слоя в I области, то транзистор нормально-открытый. Для создания универсальной платформы при подборе параметров для р-канального транзистора необходимо учитывать и параметры п-канального, чтобы он тоже был нормально-закрытым (область III на рис.8).

Таким образом, был выбран следующий состав гетероструктуры для исследуемой платформы: р-GaN толщиной 80 нм, AlGaN с мольной долей Al 23% 15 нм, канальный слой GaN, буфер AlGaN с мольной долей Al 5%, зародышевый слой AlN, подложка. На рис.9. показаны рассчитанные вольтамперные характеристики для данных приборов. Нормально-закрытый р-канальный полевой транзистор с длиной затвора, расстоянием сток-затвор и расстоянием исток-затвор по 1 мкм обладает током стока при -3 В на затворе порядка -0,9 мА/мм. Изменяя топологию прибора, варьируя длину и ширину, можно будет добиться одинаковых уровней тока для создания комплементарной пары.

Как уже говорилось выше, п-канальный прибор получается нормально-закрытым за счет р-GaN слоя, который "поднимает" зону проводимости, тем самым обедняя канал транзистора. Рассмотрим физику нормально-закрытого р-канального полевого транзистора. В данном случае весь р-слой уже сам является канальным и его параметры напрямую влияют на ток прибора. Для того, чтобы его закрыть необходимо, например, при помощи ОПЗ "перекрывать" весь р-слой или использовать какой-то другой подход. В литературе по аналогии со стандартными подходами предлагают углублять затвор в р-слой и обрабатывать подзатворную область кислородом [11]. В данной статье мы предлагаем нарастить в области затвора  $p^+$ -GaN, чтобы образовался р-GaN/ $p^+$ -GaN гетеропереход, ОПЗ которого и будет управлять каналом. Здесь может возникнуть другая проблема. Такой р-канальный транзистор получается двухканальным. Один канал дырочный – это весь слой

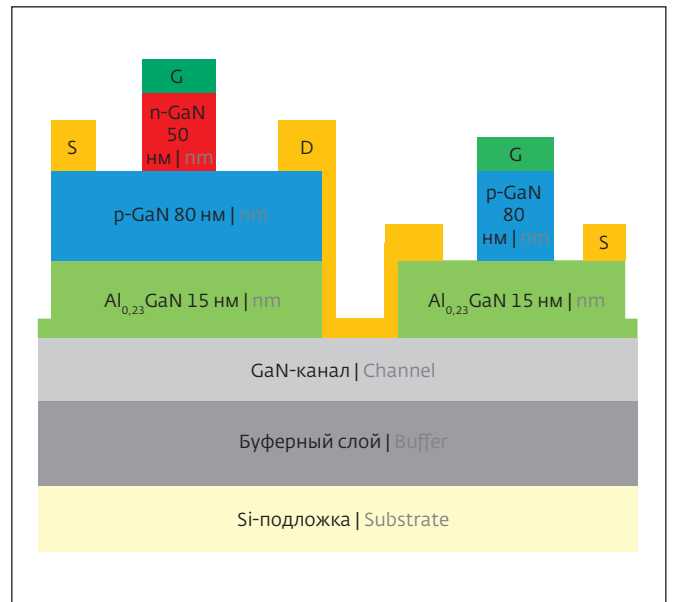


Рис.7. Схематичное изображение комплементарной пары на основе разрабатываемых GaN транзисторов  
Fig.7. Schematic representation of a complementary pair based on GaN transistors under development

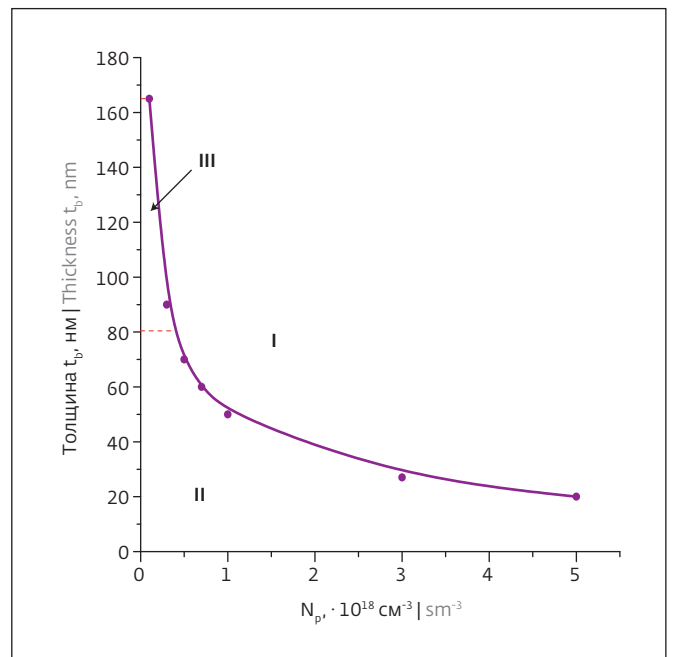


Рис.8. Влияние параметров канального слоя – его толщины  $t_p$  и содержания примеси в нем  $N_p$  – на тип р-канального транзистора. I – нормально-открытые приборы, II – нормально-закрытые и III – область, где оба транзистора нормально-закрытые

Fig.8. Influence of the channel layer parameters - its thickness  $t_p$  and impurity concentration  $N_p$  in it - on the type of p-channel transistor. I – normally-on devices, II – normally-off and III – area where both transistors are normally-off



p-GaN, и электронный канал – из-за поляризации на гетеропереходе AlGaIn/GaN, который в состоянии покоя перекрыт из-за p-слоя сверху. Электронный канал не влияет на работу прибора, т.к. он работает при положительных смещениях, поэтому электронный канал получается перекрыт всегда.

### ВЫВОДЫ

Продемонстрировано моделирование нормально-закрытых транзисторов на основе GaN. Исследовано влияние параметров гетероструктуры на поведение нормально-закрытого p-канального транзистора с p-GaN затвором и нормально-закрытого p-канального транзистора, управляемого p-n-переходом. Подобрана оптимальная конструкция гетероструктуры для получения различных типов приборов в едином технологическом цикле. Разработаны методики определения типов приборов по ключевым параметрам гетероструктуры. Рассмотрена физика работы приборов.

Таким образом, нормально-закрытый p-канальный транзистор, управляемый p-затвором длиной 1 мкм, расстоянием исток-затвор 1 мкм и расстоянием сток-затвор 6 мкм обладает максимальным током стока 350 мА/мм при 3,5 В на затворе. Нормально-закрытый p-канальный транзистор управляемый ОПЗ p-n-перехода с расстояниями между электродами по 1 мкм обладает током стока при -3 В на затворе порядка -0,9 мА/мм.

Разработанные приборы позволят создавать так называемые "платформы" с различными типами приборов, которые открывают возможность формирования комплементарных пар и различных схем в едином цикле, тем самым расширят ЭКБ России. Также разработанные приборы смогут заменить силовые GaAs приборы и увеличить их мощность (в 5G технологиях, например).

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках государственного задания FSMR-2022-0004.

### ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

**Декларация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

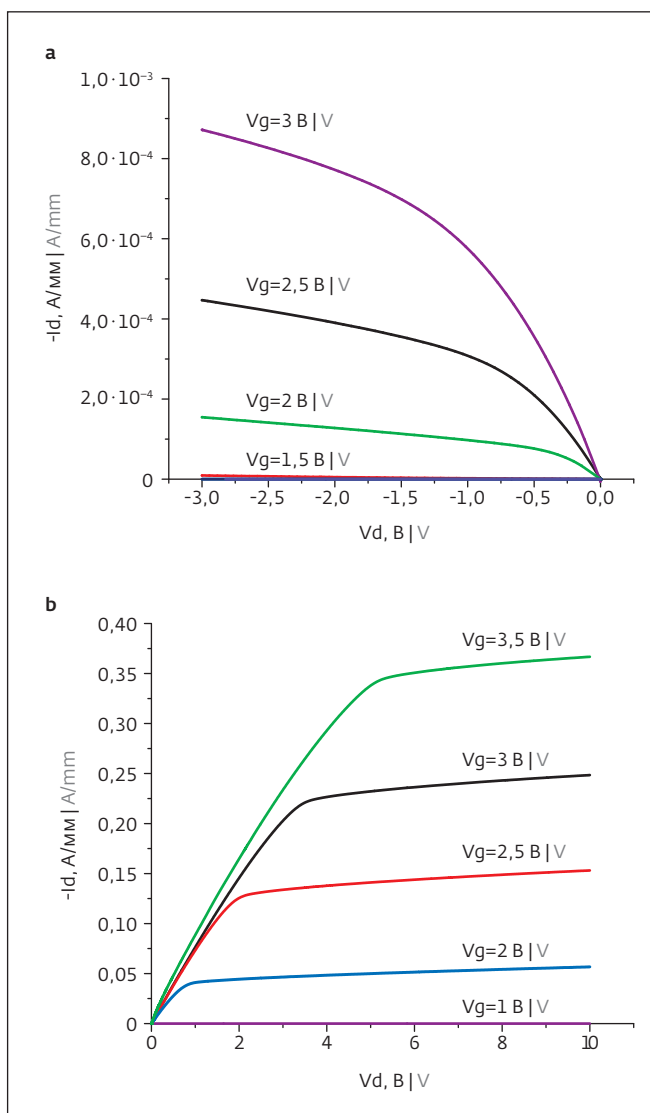


Рис.9. Вольтамперные характеристики рассматриваемых транзисторов: p-канального полевого транзистора (слева) и n-канального транзистора с p-затвором (справа)  
Fig.9. Current-voltage characteristics of the considered transistors: p-channel FET (left) and n-channel p-gate transistor (right)

As mentioned above, an n-channel device is normally closed due to the p-GaN layer, which 'lifts' the conduction band, thereby depleting the transistor channel. Let us consider physics of a normally-off p-channel field effect transistor. In this case the entire p-layer itself is already channelized and its parameters directly impact the device current. In order to close it, it is necessary, to "overlap" the entire p-layer with the help of the RCD, or use some other approach.

In the literature, similarly to the standard approaches, it is proposed to deepen the gate into the p-layer and treat the sub-gate region with oxygen [11].



## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Ohmaki Y., Tanimoto M., Akamatsu S., Mukai T.** Enhancement-mode AlGaIn/GaN high electron mobility transistor with low on-state resistance and high breakdown voltage. / Japanese Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 45. no.2. P. 42-45.
2. **Meneghini M., Hilt O., Wuerfl J., Meneghesso G.** Technology and reliability of normally-off GaN HEMTs with p-type gate / Energies. 2017. Vol. 10, no. 2. P. 153.
3. **Chen K.J.** Enhancement mode AlGaIn/GaN HEMT and MIS HEMT technology / K.J. Chen C. Zhou // Physica status solidi (a). 2011. Vol. 208, no. 2. P. 434-438.
4. **Hirose T., Imai M., Joshin K., et al.** Dynamic performances of GaN-HEMT on Si in cascode configuration / 2014. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014. IEEE, P. 174-181.
5. **Wang M., Yuan L., Chen K., et al.** Diffusion mechanism and the thermal stability of fluorine ions in GaN after ion implantation / Journal of applied physics. 2009. Vol. 105, no. 8. P. 083519.
6. **Wu T., Marcon D., Jaeger B., et al.** Time dependent dielectric breakdown (TDDB) evaluation of PE-ALD SiN gate dielectrics on AlGaIn/GaN recessed gate D-mode MIS-HEMTs and E-mode MIS-FETs / 2015. IEEE International Reliability Physics Symposium. - IEEE, 2015.
7. **Kaneko N., Machida O., Yanagihara M., et al.** Normally-off AlGaIn/GaN HFETs using NiO x gate with recess / 2009. 21st International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. - IEEE, 2009. P. 25-28.
8. **Zheng Z., Zheng L., Song W., et al.** Gallium nitride-based complementary logic integrated circuits / Nature electronics. 2021. Vol. 4. P. 595-603.
9. **Егоркин В.И., Журавлев М.Н., Капаев В.В.** Моделирование электронного транспорта в туннельно-резонансных гетероструктурах GaN/AlGaIn / Известия высших учебных заведений. Электроника. 2011. №. 2(88). С. 3-8.
10. **Chiu H., Chang Y., Li B., et al.** High-performance normally off p-GaN gate HEMT with composite AlN/Al<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>N/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N barrier layers design / Journal of the Electron Devices Society. 2018. Vol. 6. P. 201-206.
11. **Zhang W., Liu X., Fu L., et al.** Investigation of normally-off GaN-based p-channel and n-channel heterojunction field-effect transistors for monolithic integration / Results in Physics. 2021. Vol. 24. P. 104209.

In this paper we propose to grow n<sup>+</sup>-GaN in the gate region to form a p-GaN/n-GaN heterojunction, which OPD will control the channel. Here, another problem may arise. Such a p-channel transistor turns out to be two-channel. One hole channel is the entire p-GaN layer, and the electronic channel is due to polarisation on the AlGaIn/GaN heterojunction, which is overlapped at rest due to the p-layer above. The electronic channel does not impact the operation of the device as it works at positive bias, so the electronic channel is always overlapped.

## CONCLUSIONS

Modelling of GaN-based normally-off transistors is demonstrated. The influence of heterostructure parameters on behaviour of a normally-off n-channel transistor with a p-GaN gate and a normally-off p-channel transistor controlled by a p-n junction has been investigated. The optimal heterostructure design for different types of devices in a single process cycle has been selected. The techniques for determining device types by key parameters of heterostructures were developed. The physics of device operation was considered discussed.

Thus, a normally-off n-channel transistor with 1 μm long p-gate, 1 μm long source-gate and 6 μm drain-gate has a maximum drain current of 350 mA/mm at 3.5 V at the gate. A normally-off p-channel junction-driven p-n junction transistor with 1 μm electrode spacing has a drain current at -3 V at the gate of about -0.9 mA/mm.

The developed devices will make it possible to create so-called "platforms" with different types of devices that open up a possibility of forming complementary pairs and different circuits in a single cycle, thereby expanding electronic component base (ECB) of Russia. Moreover, the developed devices will be able to replace the power GaAs devices and increase their power (in 5G technologies, for example).

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was completed with the financial support of the Ministry of Education and Science, project FSMR-2022-0004.

## PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

**Declaration of Competing Interest.** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

**100% ГАРАНТИЯ**  
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер  
Периодичность: 10 номеров в год  
[www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)



Стоимость 1450 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.photonics.ru](http://www.photonics.ru)



Стоимость 1450 р. за номер  
Периодичность: 6 номеров в год  
[www.j-analytics.ru](http://www.j-analytics.ru)

# ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

[www.technosfera.ru](http://www.technosfera.ru)



Стоимость 1300 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.lastmile.ru](http://www.lastmile.ru)



Стоимость 1300 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.nanoindustry.ru](http://www.nanoindustry.ru)



Стоимость 1800 р. за номер  
Периодичность: 4 номера в год  
[www.stankoinstrument.ru](http://www.stankoinstrument.ru)