

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАНАЛЬНОГО СЛОЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОГО СВЧ ПОЛЕВОГО КАРБИД КРЕМНИЕВОГО ТРАНЗИСТОРА ШОТТКИ

М. И. Черных^{1,2}, А. Н. Цоцорин¹, В. А. Кожевников¹

¹ – Научно-исследовательский институт электронной техники,

² – Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 01.02.2015 г.

Аннотация: проведено моделирование зависимости порогового напряжения, сопротивления канала, тока насыщения и крутизны полевого транзистора с затвором Шоттки от толщины и уровня легирования канального эпитаксиального слоя. Обсуждаются оптимальные технологические параметры.

Ключевые слова: полевой транзистор с затвором Шоттки, карбид кремния, моделирование полупроводниковых приборов.

SIMULATION OF INFLUENCE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CHANNEL LAYER AT ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SIC HIGH POWER RF MESFET

M. I. Chernykh, A. N. Tsotsorin, V. A. Kozhevnikov

Abstract: the influence of epitaxy layer thickness and doping level of cut-off voltage, channel resistance, transconductance and saturation current was simulated. Optimal values of technological parameters was shown.

Keywords: MESFET, SiC, simulation of semiconductor devices.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получили транзисторы, созданные на основе карбида кремния. Обладая фундаментальными преимуществами, по сравнению с кремниевыми, они позволяют получать ранее недоступные параметры, а так же расширять возможные области применения элементной базы. Высокие теплопроводность и величина критического поля пробоя позволяют создавать транзисторы с недоступными для кремния плотностями мощности и соотношением пробивного напряжения к внутреннему сопротивлению открытого транзистора [1]. Одним из основных типов транзисторов на основе карбида кремния является полевой транзистор с затвором Шоттки (ПТШ). Данный тип приборов создается на эпитаксиальных структурах карбида кремния, сформированных на полуизолирующей подложке карбида кремния с высоким удельным сопротивлением порядка 10^9 Ом·см. Эпитаксиальная структура, в общем случае, содержит буферный слой р-типа проводимости, канальный слой n-типа проводимости и высоколегированный слой n^+ типа для формирования омических контактов к областям стока и истока [2], [3]. Одной из актуальных задач при разработке ПТШ

является моделирование влияния параметров канального слоя, как основного активного слоя структуры, на электрические характеристики ПТШ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Типичная транзисторная структура ПТШ представлена на рисунке 1. Для создания ПТШ на полуизолирующей подложке 4H карбида кремния формируются эпитаксиальные слои: буферного слоя, канального слоя и высоколегированного слоя для создания омических контактов. Путем плазмохимического травления создаются мезоструктуры, изолирующие транзисторные ячейки, а так же формируются области стока и истока. Затвор транзистора представляет собой переход Шоттки. Ток в канале контролируется областью пространственного заряда (ОПЗ), распространяющейся от перехода Шоттки.

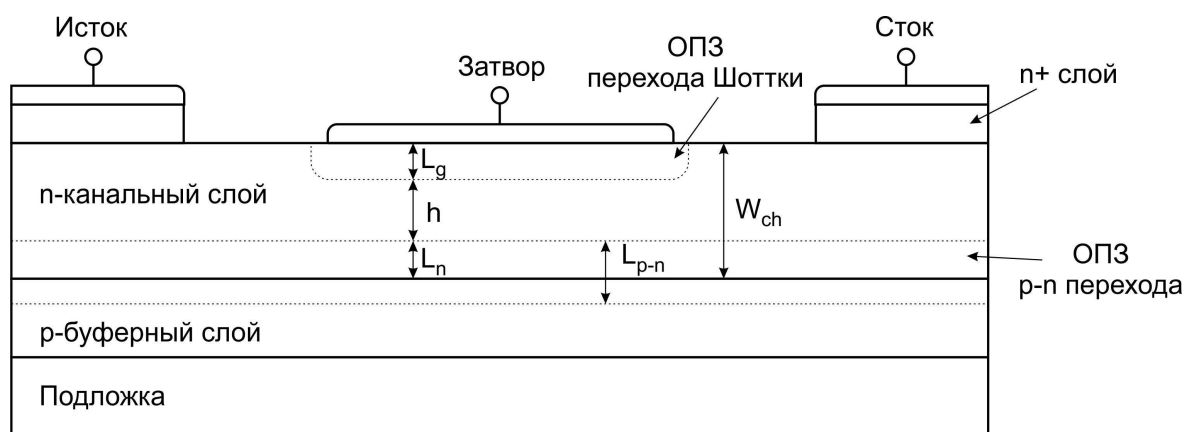


Рис. 1. Схематическое изображение сечения элементарной ячейки ПТШ.

Для оценки влияния уровня легирования канального слоя на электропараметры ПТШ приведем выражение для расчета ширины ОПЗ, распространяющейся от перехода Шоттки по толщине канала транзистора:

$$L_g = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{qN_n}(\Phi_B - V_g)}, \quad (1)$$

где N_n — концентрация легирующей примеси в канальной области, q — заряд электрона, Φ_B — контактная разность потенциалов между металлом затвора и канальным слоем карбида кремния, V_g — напряжение на затворе ПТШ, ε — относительная диэлектрическая проницаемость карбида кремния, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. Кроме ОПЗ распространяющейся от перехода Шоттки в канале будет существовать ОПЗ от р-n перехода между канальным и буферным слоем. Для определения ширины ОПЗ воспользуемся выражением для расчета контактной разности потенциала перехода между канальным и буферным слоем:

$$\varphi_{kp-n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_p \cdot N_n}{n_i^2}, \quad (2)$$

где kT — тепловая энергия, n_i — собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике, N_p — концентрация легирующей примеси в буферном слое. При этом ширина ОПЗ р-n перехода описывается выражением:

$$L_{p-n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_{kp-n}}{q} \left(\frac{1}{N_p} + \frac{1}{N_n} \right)}. \quad (3)$$

Ширина ОПЗ р-п перехода в канальной n области будет равна:

$$L_n = L_{p-n} \frac{N_p}{N_p + N_n}. \quad (4)$$

Толщина необеднённой части канального слоя, расположенной непосредственно под затвором ПТШ определяется следующим выражением:

$$h = W_{ch} - L_n - L_g(V_g), \quad (5)$$

где W_{ch} – толщина канального слоя ПТШ (рис. 1). Канал ПТШ будет перекрыт при условии распространения ОПЗ перехода Шоттки вплоть до ОПЗ р-п перехода. Это условие можно записать в виде уравнения следующим образом:

$$L_g = W_{ch} - L_n. \quad (6)$$

Тогда пороговое напряжение ПТШ, при условии $V_g \gg \Phi_B$, будет равно:

$$V_{po} = \frac{qN_n}{2\varepsilon} (W_{ch} - L_n)^2. \quad (7)$$

Сопротивление канала ПТШ будет складываться из сопротивлений сильнолегированных областей стока и истока, пассивных областей канального слоя транзистора и подзатворной области канала. Для определения сопротивления отдельных областей используем формулу:

$$R = \rho \frac{a}{b \cdot h}, \quad (8)$$

где ρ – удельное сопротивление полупроводника, зависящее от уровня легирования, a – длина участка полупроводника, b – ширина участка полупроводника. Для пассивной области канального слоя величина h равна:

$$h = W_{ch} - L_n, \quad (9)$$

где W_{ch} – толщина канала ПТШ. Для области канала, расположенной непосредственно под затвором транзистора, величина h определяется из уравнения (5). Подставляя эти уравнения в выражения (8) можно рассчитать общее сопротивление транзисторной структуры. [4]

Расчеты проводились в программном комплексе Sentaurus TCAD. В конструктивную двумерную модель ПТШ заложена толщина буферного слоя 3 мкм при уровне легирования $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Для создания омического контакта к областям стоки и истока использовался эпитаксиальный слой толщиной 0,3 мкм с концентрацией легирующей примеси 10^{19} см^{-3} . В качестве металла для формирования затвора выбран никель. Длина затвора составляет 1,5 мкм. Длина канала транзистора – 10 мкм. Поверхность кристалла над канальной областью пассивирована оксидом кремния. Толщина канального слоя варьировалась от 0,1 до 0,5 мкм. Концентрация примеси (азота) в канальном n слое варьировалась от $5 \cdot 10^{16}$ до $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Ширина затвора транзистора принята равной 1 мкм. Для упрощения расчетов в качестве подложки применялся идеальный изолятор. Представленная модель мощного СВЧ ПТШ рассчитана на напряжение питания 50 В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 представлена зависимость порогового напряжения от толщины эпитаксиального канального слоя при концентрации легирующей примеси: $5 \cdot 10^{16}$, $1 \cdot 10^{17}$ и $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Пороговое напряжение рассчитывалось при токе стока $5 \cdot 10^{-7} \text{ А}$. Результаты расчетов показали, что пороговое напряжение повышается при увеличении толщины канального слоя,

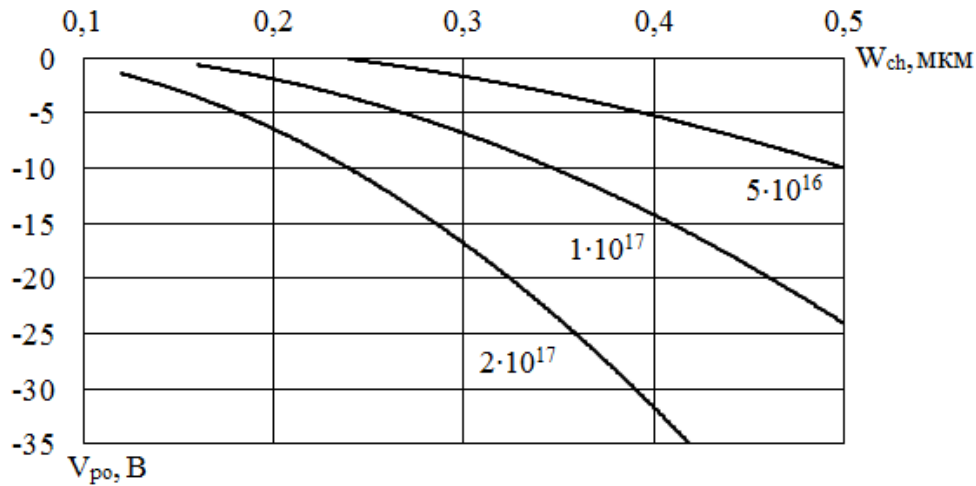


Рис. 2. Пороговое напряжение ПТШ при различной толщине канального слоя.

в соответствии с уравнением (7), из-за увеличения эффективной толщины в подзатворной области. Поэтому необходимо приложения большего напряжения для распространения ОПЗ затвора Шоттки до смыкания её с ОПЗ р-п перехода.

Зависимость сопротивления канала ПТШ от толщины канального слоя при уровне легирования слоя $5 \cdot 10^{16}$, $1 \cdot 10^{17}$ и $5 \cdot 10^{17}$ см⁻³ показана на рисунке 3. Резкое возрастание сопротивления при малых значениях толщины канала соответствует состоянию смыкания ОПЗ затвора Шоттки и р-п перехода вплоть до полного перекрытия канала транзистора. С увеличением толщины эпитаксиального канального слоя, в соответствии с уравнениями (8) и (9), происходит уменьшение сопротивления канала.

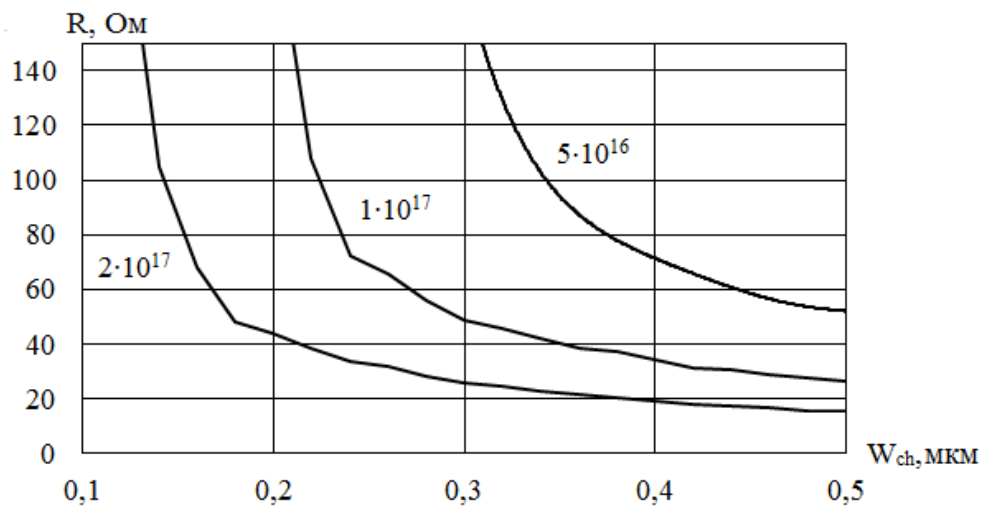


Рис. 3. Сопротивление сток-исток ПТШ при различной концентрации легирующей примеси в канальном слое.

Увеличение концентрации примеси в канальном слое, в соответствии с выражением (7), приводит к увеличению порогового напряжения ПТШ. На рисунке 4 показана зависимость порогового напряжения от концентрации легирующей примеси в канальном слое при различной толщине эпитаксиального канального слоя.

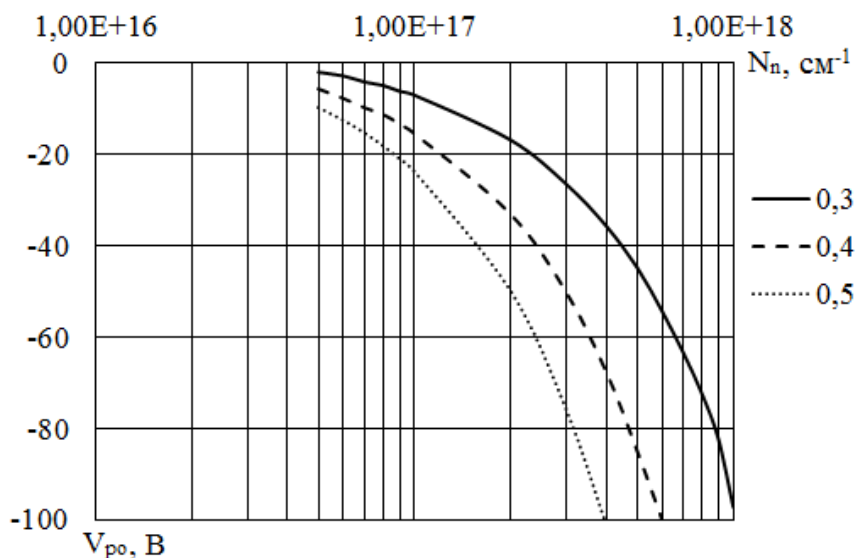


Рис. 4. Пороговое напряжение при различной концентрации легирующей примеси в канальном слое.

Изменение сопротивления при увеличении уровня легирования канального слоя обусловлено двумя факторами. С одной стороны удельное сопротивление обратно пропорционально концентрации (N). С другой стороны, подвижность носителей заряда в области канала транзистора обратно пропорциональна $(N)^{2/3}$. В итоге сопротивление канала пропорционально $(N)^{2/3}/N$. Рассчитанное сопротивления канала ПТШ в зависимости от уровня легирования канального слоя показана на рисунке 5.

Ток в канале ПТШ будет увеличиваться с увеличением уровня легирования канального слоя в следствие уменьшения сопротивления структуры. Соответствующая зависимость представлена на рисунке 6.

Обычно полевые транзисторы проектируются с учетом заданного порогового напряжения. Из приведенных выше данных можно сделать вывод, что одну и ту же величину порогово-

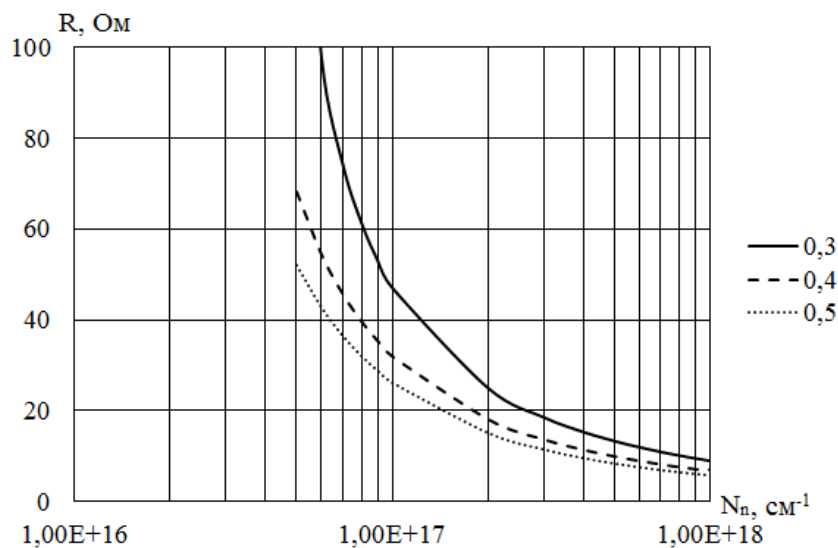


Рис. 5. Сопротивление сток-исток при различной толщине канального слоя.

го напряжения можно получить различными комбинациями толщины и уровня легирования канального слоя. При этом значение сопротивления канала для разных комбинаций будет различным. Причем чем выше концентрация примеси в канале при одном пороговом напряжении, тем меньше сопротивление канала. Несмотря на это, уменьшение толщины канала при одновременном увеличении концентрации примеси в канальном слое, при сохранении заданного значения порогового напряжения, не является универсальным путем улучшения свойств ПТШ. Во первых, при определенном, отличном от нуля, значении толщины канала произойдет полное перекрытие канала транзистора в результате смыкания ОПЗ перехода Шоттки и р-п перехода. Во вторых, при увеличении уровня легирования канального слоя уменьшается подвижность носителей в канале, что уменьшает максимальную частоту, при которой возможна работа прибора. В третьих, увеличение уровня легирования канального слоя уменьшает пробивное напряжение сток-исток при закрытом канале транзистора. Таким образом, для получения максимальной мощности (минимального сопротивления) для заданного порогового напряжения необходимо выбирать вариант комбинации технологических параметров с наименьшей толщиной канала (исключающей перекрытие канала ОПЗ), а для создания прибора с максимальной рабочей частотой необходимо для заданного порогового напряжения выбирать комбинацию с максимальной толщиной канального слоя и с минимальным уровнем легирования, обеспечивающей максимальную подвижность носителей заряда в канале ПТШ.

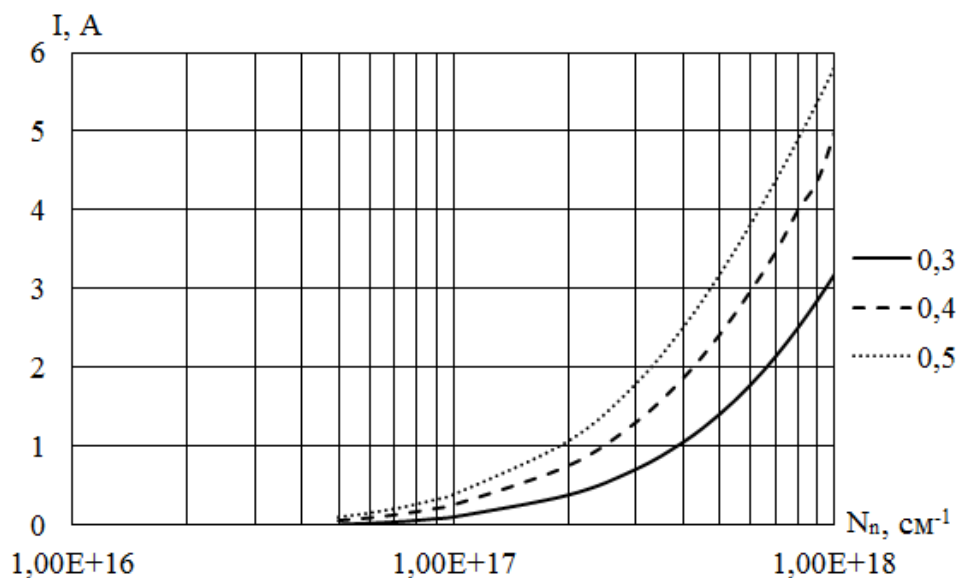


Рис. 6. Ток стока при различной концентрации легированной примеси в канальном слое.

Крутизна ПТШ представляет собой отношение изменения тока в канале к изменению напряжения на затворе ПТШ. Крутизна тем выше, чем больший ток возможно перекрыть меньшим напряжением на затворе. При увеличении концентрации в канальной области ПТШ пороговое напряжение и ток стока будут одновременно расти. При этом зависимость крутизны от уровня легирования канального слоя, изображенная на рисунке 7, имеет ярко выраженный максимум в диапазоне концентраций примеси от $5 \cdot 10^{16}$ до 10^{18} см^{-3} .

Таким образом, при проектировании ПТШ возможен подбор значений параметров канального слоя таким образом, чтобы получить максимальное значение крутизны транзистора.

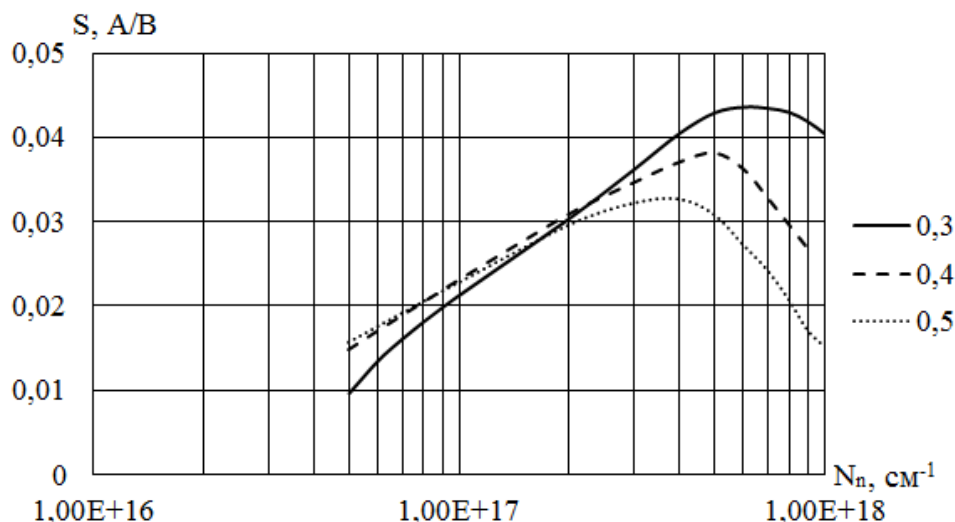


Рис. 7. Крутизна при различной концентрации легирующей примеси в канальном слое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании ПТШ на основе карбида кремния для различных конечных целей возможна оптимальная комбинация технологических параметров для получения минимального сопротивления канала, максимальной подвижности в канале, максимальной крутизны или максимального пробивного напряжения сток-исток и порогового напряжения. При этом уменьшение сопротивления канала за счет увеличения уровня легирования канального слоя ПТШ, при данной конструкции, неизбежно приведет к уменьшению пробивного напряжения и подвижности основных носителей в канале транзистора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Wide Bandgap Semiconductors. Growth, Processing and Applications / Edited by J. Pearton. — Noyes Publications, 2000. — 460 p.
- [2] Fabrication of SiC MESFET's for Microwave Applications / Ji-Hak Jung, Hoon Park, Jin-Kuk Park, Hyun-Chang Park // Journal of the Korean Physical Society. — 2002. — Vol. 40, No. 4. — P. 588–591.
- [3] Полевой транзистор с затвором Шоттки на основе 4H-SiC и оценка его СВЧ-характеристик / В.А. Гудков, А.С. Мокеев, В.Е. Земляков и др. // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. — 2007. — вып. 3. — С. 3–9.
- [4] Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х т. / С. Зи. — М.: Мир, 1984. — 456 с.

REFERENCES

- [1] WIDE BANDGAP SEMICONDUCTORS. Growth, Processing and Applications. Edited by J. Pearton. Noyes Publications. 2000, 460 p.
- [2] Ji-Hak Jung, Hoon Park, Jin-Kuk Park, Hyun-Chang Park, Fabrication of SiC MESFET's for Microwave Applications. Journal of the Korean Physical Society, 2002, vol. 40, no. 4, pp. 588–591.
- [3] Gudkov V.A., Mokeev A.S., Zemlyakov V.E. et. al. 4H-SiC MESFET and his RF properties. [Gudkov V.A., Mokeev A.S., Zemlyakov V.E. i dr. Polevoj tranzistor s zatvorom Shottki na osnove

4H-SiC i ocenka ego SVCh-karakteristik]. *E'lektronnaya tekhnika, ser. 1, SVCh-tekhnika — Electronic engineering, ser. 1, RF engineering*, 2007, iss. 3, pp. 3–9.

[4] Sze S. *Physics of Semiconductor Devices*. [Zi S. *Fizika poluprovodnikovyx priborov: V 2-x t*]. Moscow: Mir, 1984, 456 p.

Черных Максим Игоревич, аспирант физического факультета Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: che@niiet.ru

Cherhykh Maksim Igorevich, post-graduate student, Faculty of Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation
E-mail: che@niiet.ru

Цоцорин Андрей Николаевич, начальник лаборатории НИИ Электронной Техники, кандидат физико-математических наук, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: tsotsorin@niiet.ru

Tsotsorin Andrey Nikolaevich, head of laboratory, Research institute of electronic engineering, Candidate of physical and mathematical sciences, Voronezh, Russian Federation
E-mail: tsotsorin@niiet.ru

Кожевников Владимир Андреевич, начальник отдела НИИ Электронной техники, кандидат технических наук, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: vak@niiet.ru

Kozhevnikov Vladimir Andreevich, department head, Research institute of electronic engineering, Candidate of technical science, Voronezh, Russian Federation
E-mail: vak@niiet.ru