

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 621.382.323

DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-391-401

Нормально-закрытый транзистор с затвором p -типа на основе гетероструктур AlGaIn/GaN

*В.И. Егоркин, В.А. Беспалов, А.А. Зайцев, В.Е. Земляков,
В.В. Капаев, О.Б. Кухтяева*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва,
Россия*

egorkin@qdn.miee.ru

Традиционные AlGaIn/GaN-транзисторы – приборы, работающие в режиме обеднения. Для большинства применений необходимо реализовывать E -режим работы, когда ток в канале не течет при нулевом напряжении на затворе. Возможность реализации работы транзистора в E -режиме открывает широкие перспективы для проектирования цифровых схем и силовых устройств. В работе рассмотрен новый способ формирования нормально-закрытых транзисторов, работающих в E -режиме, – использование p -GaIn-слоя под затвором. В качестве метода формирования данного слоя выбрано плазмохимическое удаление p -GaIn-слоя вне затвора. При этом возникают проблемы неоднородности травления по глубине и плохого контроля скорости травления. Разработана гетероструктура с дополнительным барьерным слоем AlN, который является стоп-слоем при травлении. Приведены результаты исследования влияния различных параметров гетероструктуры на концентрацию носителей в канале и, соответственно, на выходные характеристики транзистора, разработан технологический маршрут. По разработанному технологическому маршруту сформированы образцы нормально-закрытых транзисторов, максимальный ток стока которых в открытом состоянии составляет 350 мА/мм при напряжении на затворе 4 В, пробивное напряжение – около 550 В в закрытом состоянии при 0 В на затворе.

Ключевые слова: нитрид галлия; нормально-закрытый транзистор; p -затвор; TCAD-моделирование

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2019-068 от 26 ноября 2019 г.).

Для цитирования: Нормально-закрытый транзистор с затвором *p*-типа на основе гетероструктур AlGaN/GaN / В.И. Егоркин, В.А. Беспалов, А.А. Зайцев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 5. С. 391–401. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-391-401

Normally-off *p*-Gate Transistor Based on AlGaN/GaN Heterostructure

***V.I. Egorkin, V.A. Bepalov, A.A. Zaitsev, V.E. Zemlyakov,
V.V. Kapayev, O.B. Kukhtyaeva***

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

egorkin@qdn.miee.ru

Abstract: The GaN based devices with respect to most parameters exceed the devices based on traditional semiconductor materials. The AlGaN-transistors are the devices, operating in the depletion mode. For most applications it is necessary to implement the operating mode *E*, when the current in the channel is closed at zero gate voltage. In this paper the novel method namely using the *p*-GaN layer under the gate has been considered. The plasma-chemical removal of *p*-GaN layer in the non-gated active region has been chosen as a formation method of this layer. In this case the challenges, namely the non-uniformity in the depth of etching and poor control of the etching rate, arise. To exclude these problems, the heterostructures with additional AlN barrier layer has been developed. The research results of the heterostructure parameters affecting the carrier concentration in the channel, and, respectively, the transistor output characteristics have been presented and the developed design process has been shown. According to it the normally-off transistors have been formed. The maximum drain current in the open state is 350 mA/mm at 4 V gate voltage and the breakdown voltage is about 550 V in closed state at 0 V gate voltage.

Keywords: gallium nitride (GaN); normally-off high electron mobility transistor (HEMPT); *p*-gate; TCAD simulation

Funding: this study has been supported by the Government of the Russian Federation (Agreement No. 075-11-2019-068 of November 26, 2019).

For citation: Egorkin V.I., Bepalov V.A., Zaitsev A.A., Zemlyakov V.E., Kapayev V.V., Kukhtyaeva O.B. Normally-off *p*-gate transistor based on AlGaN/GaN heterostructure. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 5, pp. 391–401. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-5-391-401

Введение. Гетероструктуры на основе GaN характеризуются уникальными электрофизическими свойствами [1], а приборы на его основе по многим параметрам превосходят приборы на основе традиционных полупроводниковых материалов. Широкая запрещенная зона обеспечивает высокие значения напряженности критического поля, что делает материал пригодным для изготовления высоковольтных устройств. Низкая собственная концентрация носителей в GaN является также следствием широкой запре-

щенной зоны. Эта характеристика позволяет увеличить максимальную температуру работы устройств, изготовленных из данного материала, и снизить токи утечки. Относительно высокие значения подвижности и концентрации носителей заряда в двумерном электронном газе (2DEG) обеспечивают большой ток насыщения структуры.

Классические GaN/AlGaN-транзисторы – это нормально-открытые приборы, работающие в режиме обеднения. Однако для более широкого применения в монолитных схемах и силовых приборах необходимо реализовать так называемый *E*-режим работы, или нормально-закрытое состояние транзисторов, когда ток не течет при нулевом напряжении на затворе. Возможность реализации *E*-режима открывает широкие перспективы для проектирования цифровых схем и устройств силовой электроники [2].

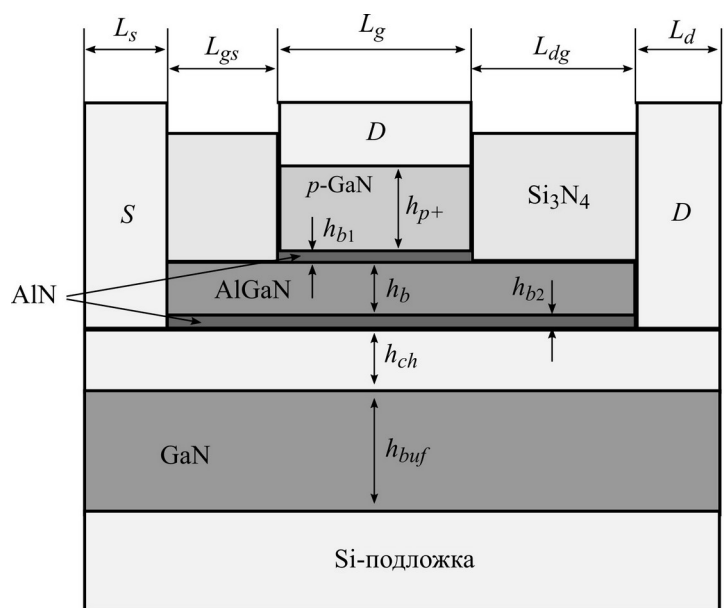
Важной характеристикой, определяющей тип прибора, является пороговое напряжение, которое зависит от параметров гетероструктуры. Для создания нормально-закрытого прибора необходимо обеспечить отсутствие носителей заряда в канале при нулевом напряжении на затворе. В основном это определяется конструкцией гетероструктуры [3, 4]. Параметры слоев, процентный состав, толщина слоев влияют на пороговое напряжение, следовательно, и на концентрацию носителей заряда в канале.

Существует несколько способов формирования GaN-транзисторов, работающих в режиме обогащения: утонение барьерного слоя в области под затвором [5]; обработка подзатворной области во фторсодержащей плазме [6]; формирование под затвором слоя *p*-типа проводимости (*p*-GaN, *p*-AlGaN или NiO_x) [7–9].

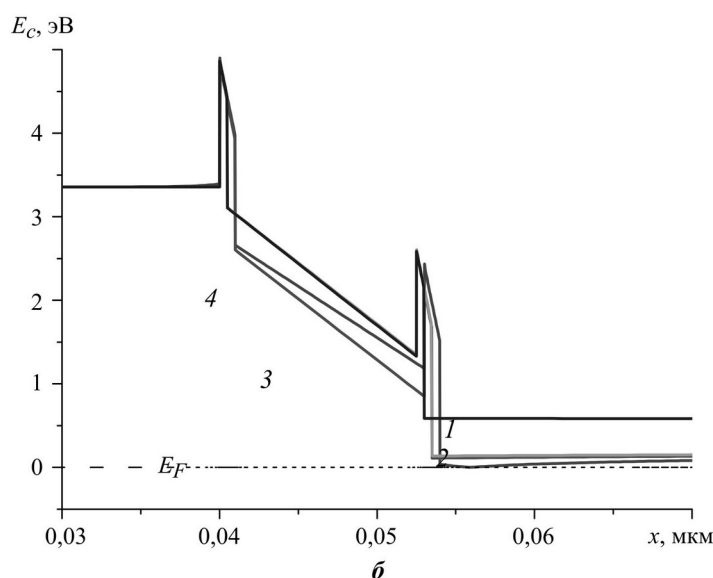
Наиболее перспективным методом формирования нормально-закрытого транзистора является создание слоя *p*-типа проводимости под затвором. В качестве *p*-слоя наносят либо NiO_x, который при определенной термической обработке принимает свойства полупроводника *p*-типа, либо эпитаксиально выращенный слой *p*-GaN или *p*-AlGaN. Слой *p*-типа увеличивает потенциал в канале, тем самым полностью истощая его. Данный метод обеспечивает точный контроль порогового напряжения и малые значения токов утечки в затвор. Недостаток данного метода заключается в том, что при прямом смещении происходит необратимая деградация *p*-слоя и транзистор неработоспособен [10].

Слой *p*-GaN или *p*-AlGaN под затвором можно получать различными способами: селективным выращиванием *p*-слоя через соответствующую маску; обработкой слоя *p*-GaN вне затворной области в водородной плазме, при которой атомы H плазмы и атомы Mg, которыми легирован *p*-слой, образуют нейтральные соединения H-Mg, в результате чего изменяются свойства слоя *p*-GaN; плазмохимическим удалением *p*-слоя в областях канала вне затвора [11].

Моделирование нормально-закрытого транзистора с *p*-GaN-затвором. При моделировании в качестве основы для нормально-закрытого HEMT-транзистора (гетероструктурного транзистора с высокой подвижностью) выбрана конструкция гетероструктуры, аналогичная конструкции, рассмотренной в [12]. Барьерный слой AlGaN ограничен двумя дополнительными барьерными слоями: снизу – спейсерным слоем AlN, сверху – стоп-слоем AlN. Спейсерный слой уменьшает рассеяние носителей на гетеропереходе AlGaN/GaN, верхний барьер AlN формирует потенциал в гетероструктуре, который способствует уменьшению токов утечки в затвор. Таким образом, последовательность слоев следующая: *p*⁺-GaN толщиной $h_p = 40$ нм, верхний барьер AlN толщиной $h_{b1} = 1$ нм, основной барьер AlGaN толщиной $h_b = 12$ нм, спейсерный барьер AlN толщиной $h_{b2} = 1$ нм, область канала GaN толщиной $h_{ch} = 20$ нм. В процессе формирования затвора слой *p*⁺-GaN удаляется в необходимых областях до стоп-слоя AlN, после чего удаляется стоп-слой и осаждается пассивирующий диэлектрик. Конструкция моделируемого прибора представлена на рис. 1.



a



b

Рис.1. Геометрия моделируемой структуры (а) и зонные диаграммы подзатворной области при различных толщинах слоев AlN: 1 – $h_{b1} = h_{b2} = 0,5$ нм; 2 – $h_{b1} = 0,5$ нм; $h_{b2} = 1,0$ нм; 3 – $h_{b1} = 1,0$ нм; $h_{b2} = 0,5$ нм; 4 – $h_{b1} = h_{b2} = 1,0$ нм (б) (L_s – длина истока; L_{gs} – расстояние от истока до затвора; L_g – длина затвора; L_{dg} – расстояние от затвора до стока; L_d – длина стока; h_{buf} – толщина буферного слоя GaN)

Fig.1. Schematic cross-sectional view of simulated structure (a) and band diagrams of heterostructures with various AlN thicknesses: 1 – $h_{b1} = h_{b2} = 0,5$ nm; 2 – $h_{b1} = 0,5$ nm; $h_{b2} = 1,0$ nm; 3 – $h_{b1} = 1,0$ nm; $h_{b2} = 0,5$ nm; 4 – $h_{b1} = h_{b2} = 1,0$ nm (b) (L_s – source length; L_{gs} – gate-to-source length; L_g – gate length; L_{dg} – gate-to-drain length; L_d – drain length; h_{buf} – GaN buffer layer thickness)

Основные параметры гетероструктуры, обеспечивающие нормально-закрытое состояние, можно получить, решая только статистическую задачу. Основной целью при этом является определение зависимости концентрации электронов в канале от параметров структуры. В рассматриваемых структурах канал формируется на гетеропереходе GaN/AlN и для расчета концентрации носителей в канале необходимо решать квантово-

механическую задачу. Можно упростить задачу – решить только уравнения Пуассона и уравнения переноса [13, 14]. Для получения нормально-закрытого прибора толщина основного барьера должна быть достаточно малой. Дополнительные барьеры должны быть также достаточно малы, поскольку их наличие увеличивает эффективную толщину барьера в соотношении $1/x$.

Моделирование показало, что при толщине основного барьера $h_b = 12$ нм нормально-закрытое поведение прибора обеспечивается при толщине дополнительных барьеров по 0,5 нм (см. рис.1), поскольку в этом случае квантовая яма в области гетероперехода не образуется. При изменении толщин дополнительных барьерных слоев до 1 нм или при толщине одного слоя 0,5 нм, а другого 1 нм образуются квантовая яма и двумерный электронный газ. В результате прибор становится нормально-открытым даже при нулевом смещении на затворе.

Другими параметрами, которые определяют зонную диаграмму прибора и, соответственно, тип прибора являются толщина основного барьерного слоя и содержание Al в нем. В случае большой мольной доли Al в основном барьерном слое даже наличие слоя *p*-GaN не обеспечит нормально-закрытого поведения прибора. Малая доля Al позволяет более эффективно обеднить канал и уменьшает влияние рассогласования параметров решетки с GaN [15].

Исследовались зависимости концентрации носителей в канале N_c от толщины барьерного слоя AlGaN h_b и от содержания Al в этом слое $x(\text{Al})$ (рис.2). Зависимость $N_c(h_b)$ носит пороговый характер, при этом $h_b \sim 14$ нм. В некотором узком диапазоне наблюдаются линейный рост и затем насыщение. Как следует из результатов моделирования, прибор является нормально-закрытым при толщине слоя AlGaN менее 14 нм при мольной доле Al в нем 17 % (рис.2,а). Зависимость концентрации N_c от мольной доли Al в данном барьерном слое $x(\text{Al})$ оказывается практически линейной в широком диапазоне. Из рис.2,б видно, что транзистор является нормально-открытым, если мольная доля Al больше 21 % при толщине слоя AlGaN $h_b = 12$ нм.

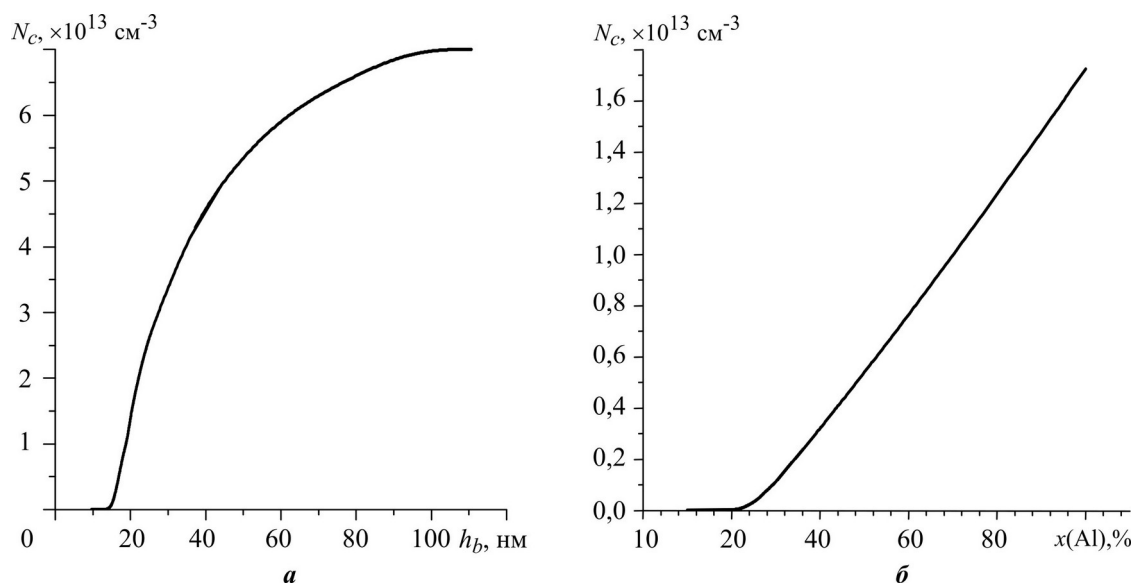


Рис.2. Зависимость слоевой концентрации двумерного электронного газа в канале N_c от толщины AlGaN барьерного слоя h_b при $h_{b1} = h_{b2} = 0,5$ нм и $x(\text{Al}) = 17\%$ (а) и мольной доли Al в барьерном слое AlGaN $x(\text{Al})$ при $h_b = 12$ нм (б)

Fig.2. Dependence of channel carrier density N_c on AlGaN barrier layer thickness h_b at $h_{b1} = h_{b2} = 0,5$ nm and $x(\text{Al}) = 17\%$ (a) and Al mole fraction ($x(\text{Al})$) in the AlGaN barrier layer at $h_b = 12$ nm (b)

Другими немаловажными параметрами являются толщина слоя p^+ -GaN h_{p^+} и концентрация примеси в нем N_{p^+} . Эти величины должны быть такими, чтобы толщина h_{p^+} превышала толщину области истощения для N_{p^+} . В рассматриваемом случае, исходя из практических результатов легирования Mg, установили концентрацию примеси в *cap*-слое p^+ -GaN $N_{p^+} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. По результатам моделирования (рис.3,а) для такого значения концентрации в *cap*-слое p^+ -GaN его толщина должна быть не менее 20 нм.

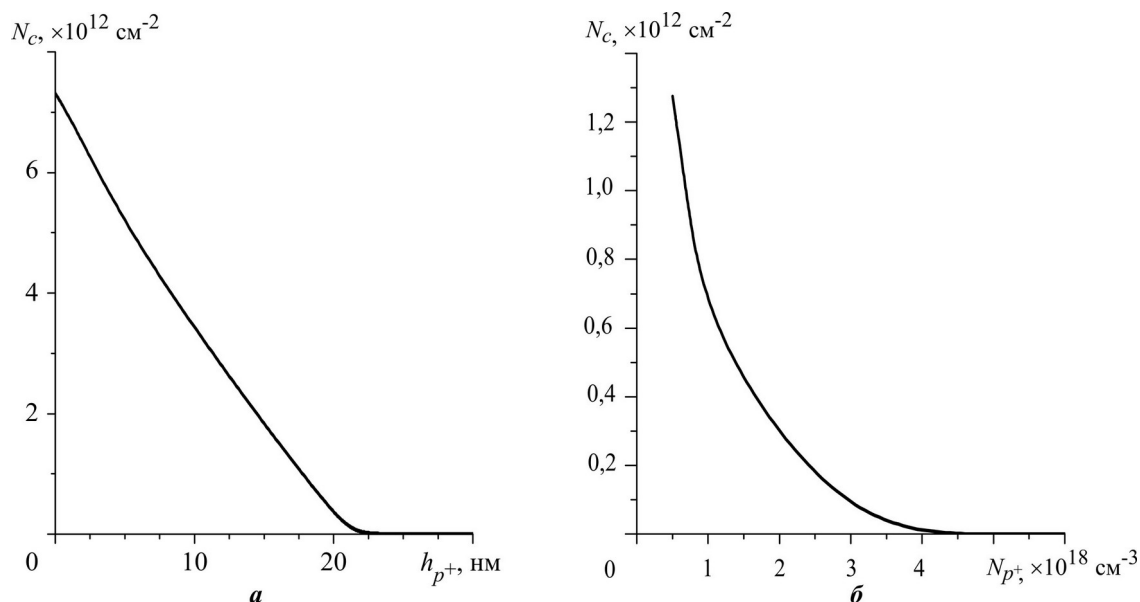


Рис.3. Зависимость плотности носителей в канале N_c от толщины *cap*-слоя p -GaN h_{p^+} при $h_{b1} = h_{b2} = 0,5 \text{ нм}$, $h_b = 12 \text{ нм}$, $N_c = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (а) и концентрации примеси в *cap*-слое p -GaN N_{p^+} при $h_{p^+} = 40 \text{ нм}$, $h_{b1} = h_{b2} = 0,5 \text{ нм}$, $h_b = 12 \text{ нм}$ (б)

Fig.3. Dependence of channel carrier density N_c on p -GaN layer thickness h_{p^+} at $h_{b1} = h_{b2} = 0,5 \text{ nm}$, $h_b = 12 \text{ nm}$, $N_c = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (a) and concentration in p -GaN layer N_{p^+} at $h_{p^+} = 40 \text{ nm}$, $h_{b1} = h_{b2} = 0,5 \text{ nm}$, $h_b = 12 \text{ nm}$ (b)

С повышением концентрации примеси в слое p -GaN глубина квантовой ямы уменьшается и, соответственно, уменьшается плотность носителей заряда в канале [16]. Повышение концентрации примеси в *cap*-слое приводит к тому, что уменьшается величина поверхностного потенциала, что, в свою очередь, ведет к увеличению порогового напряжения транзистора и улучшению его ключевых характеристик [16]. Однако для оптимальной работы транзистора необходимо подбирать оптимальное легирование *cap*-слоя p -GaN, поскольку увеличение степени легирования *cap*-слоя позволяет уменьшить токи утечки в затвор, но в то же время уменьшает напряжение пробоя [17]. Также высокая концентрация примеси N_{p^+} ухудшает кристаллическое качество слоя и не позволяет увеличить количество электрически активных акцепторов [18], поэтому важно исследовать влияние N_{p^+} на формирование проводящего канала.

На рис.3,б показана зависимость носителей в канале N_c от концентрации примеси в *cap*-слое p -GaN N_{p^+} при толщине слоя p -GaN $h_{p^+} = 40 \text{ нм}$ и толщине дополнительных и основных барьерных слоев $h_{b1} = h_{b2} = 0,5 \text{ нм}$, $h_b = 12 \text{ нм}$. Моделирование показало, что при такой толщине *cap*-слоя прибор будет нормально-закрытым, если концентрация примеси в нем менее $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. По зависимости концентрации носителей в канале от напряжения, приложенного к затвору, определено пороговое напряжение транзистора, которое составило 1,5 В.

Формирование нормально-закрытого транзистора. На основе результатов моделирования выбран оптимальный состав гетероструктуры. На рис.4 показан разработанный технологический маршрут изготовления транзистора. На первом этапе формирует-

ся межприборная изоляция ионной имплантацией N, затем травится слой *p*-GaN под омические контакты, напыляются пленки Ti-Al-Ni-Au (20/100/40/30 нм) электронным лучом и вжигаются контакты в атмосфере азота при температуре 870 °С. Далее происходят формирование затвора, пассивация и металлическая разводка.

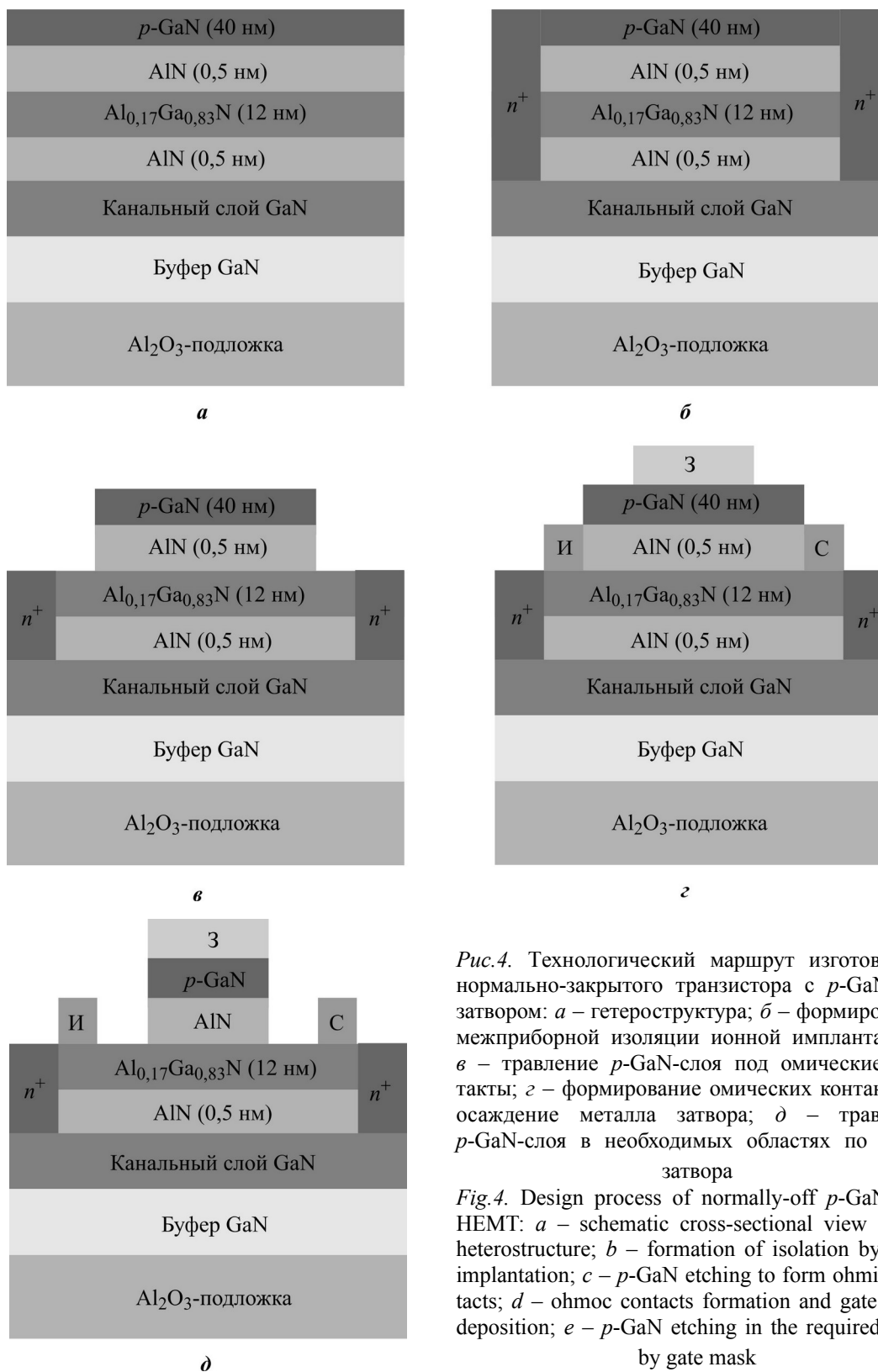


Рис.4. Технологический маршрут изготовления нормально-закрытого транзистора с *p*-GaN под затвором: *a* – гетероструктура; *б* – формирование межприборной изоляции ионной имплантацией; *в* – травление *p*-GaN-слоя под омические контакты; *г* – формирование омических контактов и осаждение металла затвора; *д* – травление *p*-GaN-слоя в необходимых областях по маске затвора

Fig.4. Design process of normally-off *p*-GaN gate HEMT: *a* – schematic cross-sectional view of the heterostructure; *b* – formation of isolation by ionic implantation; *c* – *p*-GaN etching to form ohmic contacts; *d* – ohmic contacts formation and gate metal deposition; *e* – *p*-GaN etching in the required areas by gate mask

Канал формируется путем плазмохимического удаления слоя p -GaN вне затвора. Для контролируемости этого процесса в конструкции гетероструктуры существует дополнительный барьерный слой AlN, который служит стоп-слоем при травлении, а также уменьшает токи утечки в затвор. При травлении слоя p -GaN используется смесь газов, содержащая не только хлор, но и фтор ($\text{BCl}_3 + \text{SF}_6$, $\text{BCl}_3 + \text{CF}_4$ и др.) [10, 15]. В этом случае образуются соединения AlF_3 и AlO_x , на которых и останавливается травление. Для того чтобы удалить этот тонкий диэлектрический слой, образец обрабатывается в растворе $\text{HF}/\text{NH}_4\text{OH}$ или HCl .

На рис.5 представлена ВАХ сформированного транзистора с длиной затвора 1 мкм, расстоянием исток – затвор 1,5 мкм и расстоянием сток – затвор 9,5 мкм. Максимальный ток стока прибора в открытом состоянии составляет 350 мА/мм при 4 В на затворе, пробивное напряжение – около 550 В в закрытом состоянии при 0 В на затворе.

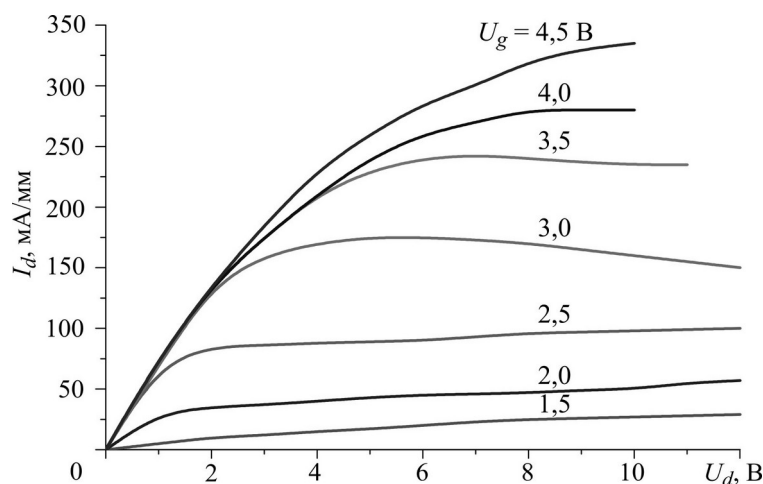


Рис.5. ВАХ сформированного транзистора
Fig.5. Output current-voltage characteristics of formed transistor

Заключение. Выбранная оптимальная конструкция гетероструктуры для формирования нормально-закрытого гетероструктурного транзистора на основе GaN с p -GaN-слоем под затвором характеризуется наличием дополнительного барьерного слоя AlN, который является стоп-слоем для травления p -GaN.

Сформированный по разработанному технологическому маршруту нормально-закрытый транзистор имеет длину затвора 1 мкм, расстояние исток – затвор 1,5 мкм и расстояние сток – затвор 9,5 мкм. Прибор характеризуется током насыщения в открытом состоянии плотностью до 350 мА/мм, крутизной до 100 мСм/мм и пробивным напряжением в закрытом состоянии 500 В при напряжении 0 В на затворе.

Литература

1. Гольцова М. Мощные GaN-транзисторы. Истинно революционная технология // Электроника: наука, технология, бизнес. 2012. № 4. С. 86–100.
2. 600-V normally off $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ MISHEMT with large gate swing and low current collapse / Z. Tang, Q. Jiang, Y. Lu et al. // IEEE Electron Device Letters. 2013. Vol. 34. No. 11. P. 1373–1375.
3. Asgari A., Kalafi M. The control of two-dimensional-electron-gas density and mobility in AlGaIn/GaIn heterostructures with Schottky gate // Materials Science and Engineering: C. 2006. Vol. 26. P. 898–901.
4. Tiwari S. Compound semiconductor device physics. Academic Press, San Diego, 1992, 32 p.
5. Landford W.B., Tanaka T., Otoki Y., Adesida I. Recessed-gate enhancement-mode GaN HEMT with high threshold voltage // Electronics Letters. 2005. Vol. 41. No. 7. P. 449–450.

6. **Cai Y., Zhou Y., Lau K.M., Chen K.J.** Control of threshold voltage of AlGaIn/GaN HEMTs by fluoride-based plasma treatment: from depletion mode to enhancement mode // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2006. Vol. 53. No. 9. P. 2207–2215.
7. **Ohmaki Y., Tanimoto M., Akamatsu S., Mukai T.** Enhancement-mode AlGaIn/AlN/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.
8. **Kambayashi H., Satoh Y., Ootomo S.** Over 100 A operation normally-off AlGaIn-GaN hybrid MOS-HFET on Si substrate with high-breakdown voltage // *Solid-State Electronics*. 2010. Vol. 54. No. 6. P. 660–664.
9. **Roccaforte F., Fiorenza P., Greco G.** Recent advances on dielectrics technology for SiC and GaN power devices // *Applied surface science*. 2014. Vol. 301. P. 9–18.
10. **Greco G., Iucolano F., Roccaforte F.** Review of technology for normally-off HEMTs with *p*-GaN gate // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2018. Vol. 78. P. 96–106.
11. **Uemoto Y., Hikita M., Ueno H.** Gate Injection Transistor (GIT) – a normally-off AlGaIn/GaN power transistor using conductivity modulation // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2007. Vol. 54. No. 12. P. 3393–3399.
12. High-performance normally off *p*-GaN gate HEMT with composite AlN/Al_{0.17}Ga_{0.83}N/Al_{0.3}Ga_{0.7}N barrier layers design / **H. Chiu, Y. Chang, B. Li et al.** // *Journal of the Electron Devices Society*. 2018. Vol. 6. P. 201–206.
13. **Bai Z., Du J., Jiang Z., Yu Q.** Design and simulation of high breakdown voltage AlGaIn/GaN HEMTs with a charged passivation layer for microwave power applications // *Journal of Computational Electronics*. 2017. Vol. 16. No. 3. P. 741–747.
14. **Mohamed A.A., Granzner R., Schwier F.** Theoretical investigation of trigate AlGaIn/GaN HEMTs // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2013. Vol. 60. P. 3335–3341.
15. High on/off ratio in enhancement-mode Al_xGa_{1-x}N/GaN junction heterostructure field-effect transistors with *p*-type GaN gate contact / **T. Fujii, N. Tsuyukuchi, Y. Hirose et al.** // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2006. Vol. 45. No. 2. P. 37–41.
16. **Adak S., Swain S., Rahaman H., Sarkar Ch.** Effect of doping in *p*-GaN gate on DC performances of AlGaIn/GaN normally-off scaled HFETs // *Devices for Integrated Circuit*. 2017. P. 372–375.
17. Field- and current-driven degradation of GaN-based power HEMTs with *p*-GaN gate: Dependence on Mg-doping level / **I. Rossetto, M. Meneghini, E. Canato et al.** // *Microelectronics Reliability*. 2017. Vol. 76–77. P. 298–303.
18. **Miyake H., Motogaito A., Hiramatsu K.** Effects of reactor pressure on epitaxial lateral overgrowth of GaN via low-pressure metalorganic vapor phase epitaxy // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1999. Vol. 38. No. 9A/B. P. L1000–L1002.

Поступила в редакцию 21.05.2020 г.; после доработки 21.05.2020 г.; принята к публикации 30.06.2020 г.

Егоркин Владимир Ильич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), egorkin@qdn.miee.ru

Беспалов Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, ректор Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), rector@miet.ru

Зайцев Алексей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ziko27@yandex.ru

Земляков Валерий Евгеньевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vzml@rambler.ru

Капаев Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), караевvv@lebedev.ru

Кухтяева Ольга Борисовна – техник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Kukhtuaeva@mail.ru

References

1. Goltsova M. High-voltage GaN transistors True revolutionary technology. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2012, no.4, pp. 86–100. (in Russian).
2. Tang Z., Jiang Q., Lu Y., Huang S., Yang S., Tang X. et al. 600-V normally off SiN_x/AlGaIn/GaN MISHEMT with large gate swing and low current collapse. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, vol. 34, no. 11, pp. 1373–1375.
3. Asgari A., Kalafi M. The control of two-dimensional-electron-gas density and mobility in AlGaIn/GaN heterostructures with Schottky gate. *Materials Science and Engineering: C*, 2006, vol. 26, pp. 898–901.
4. Tiwari S. *Compound semiconductor device physics*. Academic Press, San Diego, 1992, 32 p.
5. Landford W. B., Tanaka T., Otoki Y., Adesida I. Recessed-gate enhancement-mode GaN HEMT with high threshold voltage. *Electronics Letters*, 2005, vol. 41, no.7, pp. 449–450.
6. Cai Y., Zhou Y., Lau K.M., Chen K.J. Control of threshold voltage of AlGaIn/GaN HEMTs by fluoride-based plasma treatment: from depletion mode to enhancement mode. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2006, vol. 53, no. 9, pp. 2207–2215.
7. Ohmaki Y., Tanimoto M., Akamatsu S., Mukai T. Enhancement-mode AlGaIn/AlN/GaN high electron mobility transistor with low on-state resistance and high breakdown voltage. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 45, no. 2, pp. 42–45.
8. Kambayashi H., Satoh Y., Ootomo S. Over 100 A operation normally-off AlGaIn-GaN hybrid MOS-HFET on Si substrate with high-breakdown voltage. *Solid-State Electronics*, 2010, vol. 54, no. 6, pp. 660–664.
9. Roccaforte F., Fiorenza P., Greco G. Recent advances on dielectrics technology for SiC and GaN power devices. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 301, pp. 9–18.
10. Greco G., Iucolano F., Roccaforte F. Review of technology for normally-off HEMTs with p-GaN gate. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2018, vol. 78, pp. 96–106.
11. Uemoto Y., Hikita M., Ueno H. Gate injection transistor (GIT) – A normally-off AlGaIn/GaN power transistor using conductivity modulation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, vol. 54, no. 12, pp. 3393–3399.
12. Chiu H., Chang Y., Li B., Wang H., Kao H., Hu C. et al. High-performance normally off p-GaN gate HEMT with composite AlN/Al_{0.17}Ga_{0.83}N/Al_{0.3}Ga_{0.7}N barrier layers design. *Journal of the Electron Devices Society*, 2018, vol. 6, pp. 201–206.
13. Bai Z., Du J., Jiang Z., Yu Q. Design and simulation of high breakdown voltage AlGaIn/GaN HEMTs with a charged passivation layer for microwave power applications. *Journal of Computational Electronics*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 741–747.
14. Mohamed A.A., Granzner R., Schwier F. Theoretical investigation of trigate AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, vol. 60, pp. 3335–3341.
15. Fujii T., Tsuyukuchi N., Hirose Y., Iwaya M., Kamiyama S., Amano H. et al. High on/off ratio in enhancement-mode Al_xGa_{1-x}N/GaN junction heterostructure field-effect transistors with p-type GaN gate contact. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 45, no. 2, pp. 37–41.
16. Adak S., Swain S., Rahaman H., Sarkar Ch. Effect of doping in p-GaN gate on DC performances of AlGaIn/GaN normally-off scaled HFETs. *Devices for Integrated Circuit*, 2017, pp. 372–375.
17. Rossetto I., Meneghini M., Canato E., Barbato M., Stoffels S., Posthuma N. et al. Field- and current-driven degradation of GaN-based power HEMTs with p-GaN gate: Dependence on Mg-doping level. *Microelectronics Reliability*, 2017, vol. 76–77, pp. 298–303.
18. Miyake H., Motogaito A., Hiramatsu K. Effects of reactor pressure on epitaxial lateral overgrowth of GaN via low-pressure metalorganic vapor phase epitaxy. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 38, no. 9A/B, pp. L1000–L1002.

Received 21.05.2020; Revised 21.05.2020; Accepted 30.06.2020.

Information about the authors:

Vladimir I. Egorkin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Lead Researcher of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), egorkin@qdn.miee.ru

Vladimir A. Bespalov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Zelenograd, Moscow, Shokin sq., 1), rector@miet.ru

Alexey A. Zaytsev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Ziko27@yandex.ru

Valery E. Zemlyakov – Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vzml@rambler.ru

Vladimir V. Kapaev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head Researcher of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kapaevvv@lebedev.ru

Olga B. Kukhtyaeva – Technician of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Kukhtuaeva@mail.ru

**Информация для читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

С тематическими указателями статей за 1996 - 2019 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

<http://ivuz-e.ru>