

AlGaN/GaN диоды с барьерами Шоттки на основе Ta, Ni, WSi и TiN

И. В. Федин, Е. В. Ерофеев, В. В. Федина

В данной работе представлены планарные AlGaN/GaN диоды с барьером Шоттки, изготовленные на кремниевой подложке по бездрагметальной технологии с применением рецесса анода. В качестве анодов использовались металлизации X/Ti/Al/Ti (30/20/350/20 нм), где X – это Ta, Ni, WSi или TiN. Расстояние анод-катод $L_{А-К}$ варьировалось от 3 до 7 мкм. Ширина анода составляла 100 мкм. Для $L_{А-К} = 7$ мкм были получены следующие результаты: напряжение открывания диода ($U_{откр}$) составило 0.25 В, 0.45 В, 0.65 В, 1.6 В для Ta, Ni, WSi и TiN анодов соответственно; ток прямого смещения при $U = 1.2$ В составил 68 мА/мм, 55 мА/мм, 20 мА/мм и 0.16 мА/мм для Ta, Ni, WSi и TiN анодов соответственно; обратный ток утечки ($I_{обр}$) составил 67 мкА/мм, 13 мкА/мм, 5 мкА/мм и 0.85 мкА/мм для Ta, Ni, WSi и TiN анодов соответственно.

Ключевые слова: GaN на кремнии, AlGaN/GaN, диоды с барьером Шоттки, материал анода.

1. Введение

Широкозонные полупроводники, такие как нитрид галлия (GaN) и карбид кремния (SiC), привлекают всё большее внимание разработчиков как перспективные материалы силовой электроники. Мощные выпрямительные GaN диоды Шоттки чрезвычайно перспективны для применений в связке с GaN транзисторами в устройствах преобразовательной техники [1–16]. Проводимость в открытом состоянии и потери при переключении так же, как и токи утечки, при обратном смещении существенно ограничивают выпрямительные возможности мощных диодов с барьером Шоттки (ДБШ). GaN гетероструктурные диоды Шоттки способны пододвинуть эти ограничения, таким образом давая возможность создавать высокоэффективные диоды с низкими сопротивлениями и малыми потерями [1, 2]. Данные свойства обусловлены возникновением двумерного электронного газа, локализованного в области гетероперехода между GaN и AlGaN эпитаксиальными слоями. Данная область характеризуется высокой плотностью и подвижностью носителей заряда в канале, а также высокой электрической прочностью, что определяет качественные показатели GaN диодов [4–9]. В данной работе представлены результаты измерения ВАХ и ВФХ AlGaN/GaN ДБШ с различной анодной металлизацией.

2. Технология изготовления

GaN ДБШ изготавливались на основе гетероструктуры AlGaN/GaN, выращенной на кремниевой Si (111) подложке методом металл-органической газо-фазовой эпитаксии (MOCVD). Эпители состояли из 3 мкм GaN буферного слоя, 400 нм i-GaN канала, 1 нм AlN спэйсерного слоя и 10 нм Al_{0.25}Ga_{0.75}N барьерного слоя (рис. 1а). Для формирования рисунка на поверхности пластины (мезы, катода, анода) использовался метод лазерной литографии. Технологический маршрут изготовления GaN ДБШ представлен на рис. 1 (а–ж).

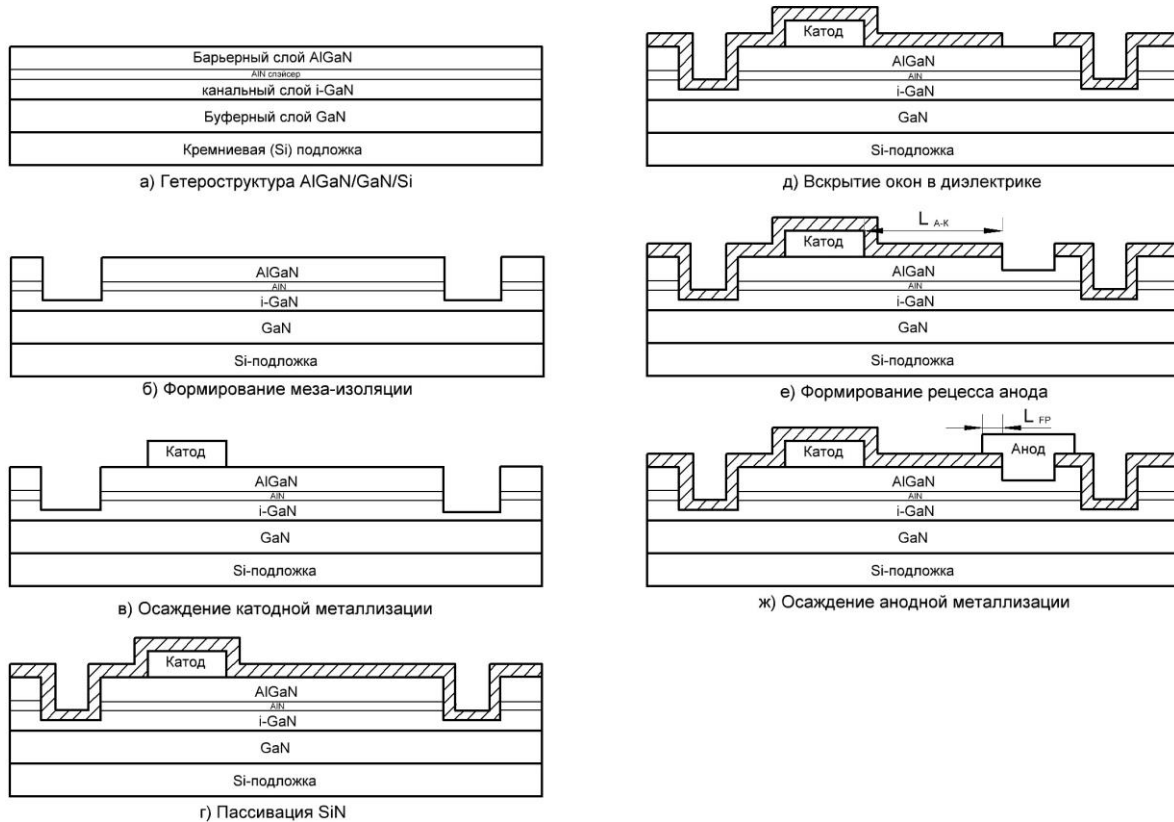


Рис. 1. Технологический маршрут создания AlGaN/GaN ДБШ

Первой операцией являлось формирование меза-изоляции методом плазмохимического травления (рис. 1б). После этого проводилось формирование низкотемпературных (550 °С) омических контактов (ОК) на основе Ta/Al металлизации методом электроннолучевого испарения в вакууме (рис. 1в). Следующей операцией была пассивация поверхности диэлектриком PECVD SiN (рис. 1г). Далее в диэлектрике вскрывались окна под анод методом сухого травления в SF₆ содержащей плазме (рис. 1д). Затем проводилось формирование рецесса анода на половину глубины AlGaN (5 нм) методом сухого травления в BC₁₃+O₂ содержащей плазме (рис. 1е) с целью уменьшения напряжения открывания и сопротивления диодов [6]. Ta и Ni анодная металлизация осаждалась методом электроннолучевого испарения в вакууме. WSi анодная металлизация формировалась магнетронным распылением WSi мишени в атмосфере аргона. TiN анодная металлизация формировалась методом реактивного магнетронного распыления Ti мишени в смеси газов Ar+N₂ (рис. 1ж). Все диоды обладали анодным полевым электродом длиной $L_{FP} = 1$ мкм, увеличивающим напряжение пробоя [1, 6].

Параметры на постоянном токе GaN диодов измерялись на измерителе полупроводниковых приборов HP4156A. Ёмкость изготовленных диодов измерялась на прецизионном LCR-метре Agilent E4980 на частоте 1 МГц.

На рис. 2 представлено микроскопическое изображение изготовленных GaN ДБШ.

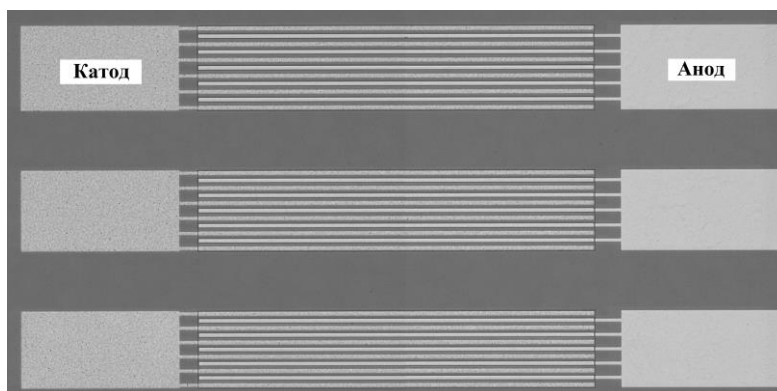


Рис. 2. Микроскопическое изображение GaN ДБШ с шириной электродов 5 мкм

3. Результаты экспериментов

На рис. 3 представлена прямая ветвь вольт-амперной характеристики (ВАХ) изготовленных GaN диодов с Ta, Ni, WSi и TiN анодами и расстоянием анод-катод $L_{A-K} = 7$ мкм.

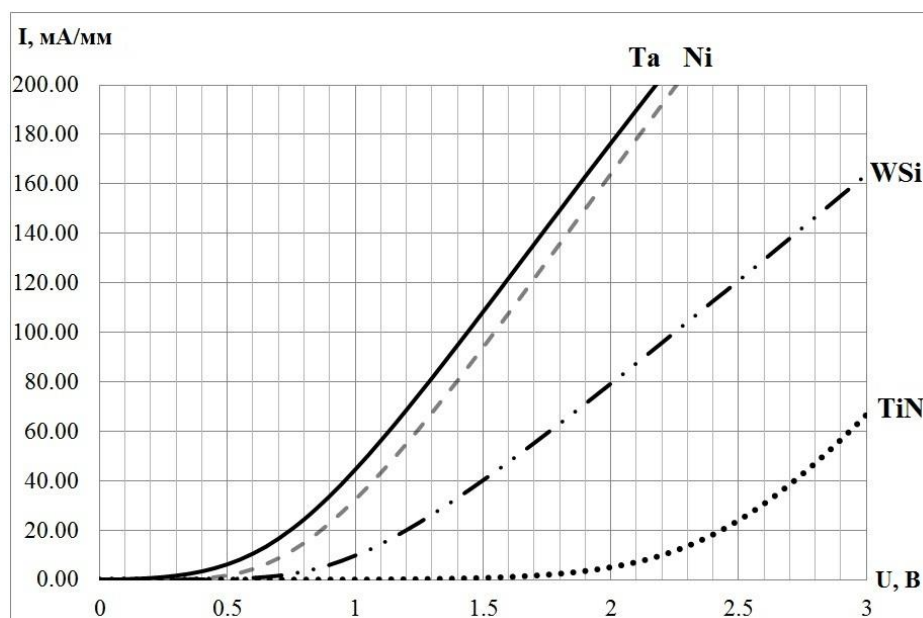


Рис. 3. Прямая ветвь ВАХ изготовленных GaN ДБШ

Прямая ветвь ВАХ полученных AlGaIn/GaN ДБШ сильно зависит от материала анода. Ток насыщения ($I_{НАС}$) при прямом смещении $U = 10$ В для диодов с расстоянием анод-катод $L_{A-K} = 7$ мкм составил 590 мА/мм, 470 мА/мм, 570 мА/мм и 520 мА/мм для Ta, Ni, WSi и TiN анодов соответственно. На рис. 4 показано напряжение открывания ($U_{ОТКР}$) полученных диодов по уровню прямого тока 1 мА/мм.

Напряжение открывания изготовленных диодов составило 0.25 В, 0.45 В, 0.65 В и 1.6 В для Ta, Ni, WSi и TiN анодов соответственно. В работе [2] напряжение открывания Al-GaN/GaN диодов с Ni/Au анодом без ресса составило 1.1 В. В работе [15] для снижения напряжения открывания до 1 В предлагается использовать селективную диффузию кремния. В настоящей работе использование ресса анода на половину глубины AlGaIn методом плазмохимического травления позволило получить напряжение открывания диодов с Ni анодом 0.45 В, что согласуется с работой [6], в которой ресс анода с заглублением в канальный i-GaN позволил снизить напряжение открывания до 0.7 В.

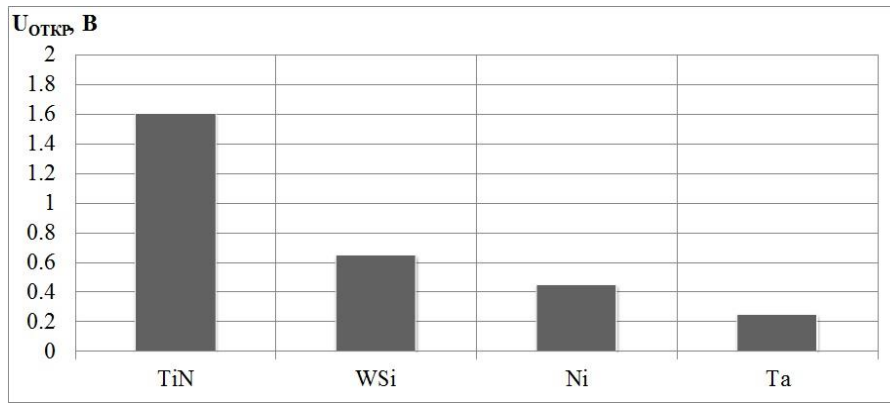


Рис. 4. Напряжение открывания изготовленных диодов с Ta, Ni, WSi и TiN анодами

На рис. 5 представлена обратная ветвь ВАХ изготовленных диодов с Ta, Ni, WSi и TiN анодами и расстоянием анод-катод $L_{A-K} = 7$ мкм.

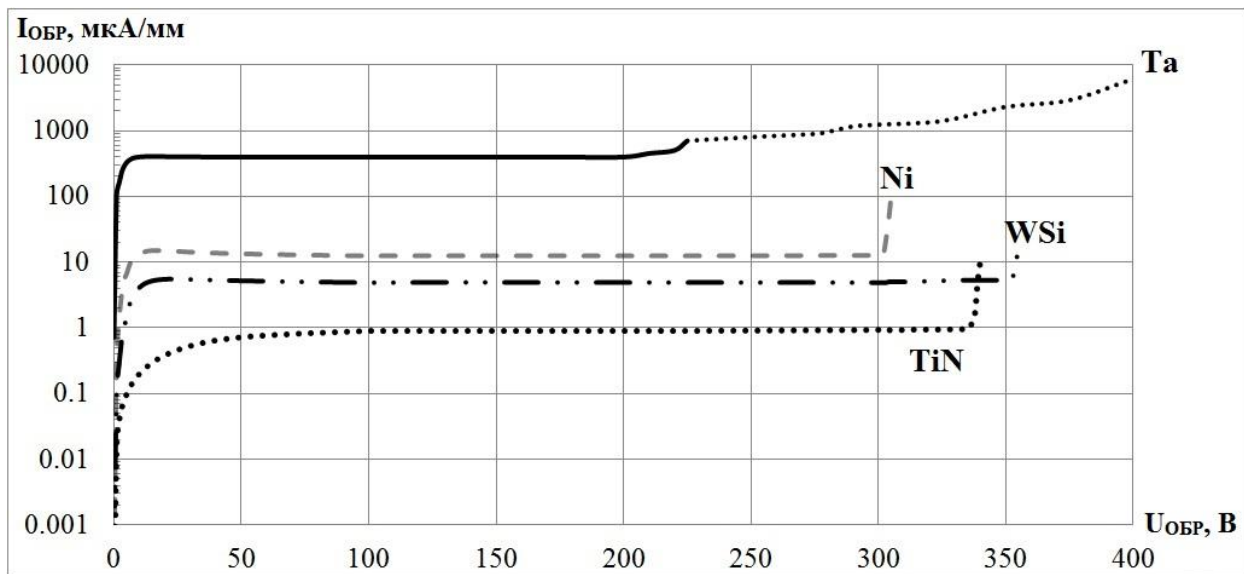


Рис. 5. Обратная ветвь ВАХ изготовленных диодов, $L_{A-K} = 7$ мкм

Диоды с анодами на основе Ni, WSi и TiN обладали традиционной зависимостью обратного тока от обратного напряжения [3, 6]. Ток утечки данных диодов возрастал до достижения насыщения (фоновый ток утечки I_{UT}) при напряжении 10 В. Фоновый ток утечки для диодов с Ni, WSi и TiN анодами составлял 12 мкА/мм, 5 мкА/мм и 0.9 мкА/мм соответственно. После достижения насыщения ток утечки возрастал очень медленно до достижения напряжения пробоя ($U_{пр}$). Пробой был быстрым и фатальным для диодов – полупроводник и металлизация разрушались.

Поведение обратного тока диодов с барьером Шоттки на основе Ta отличалось. До достижения определённого обратного напряжения (в данном случае – 220 В) ток утечки диодов с Ta анодом обладал классической зависимостью от обратного напряжения (сплошная линия для Ta на рис. 5). После достижения определённого обратного смещения ток утечки начинал быстро возрастать (прерывистая линия для Ta на рис. 5), но пробой не наступал. У диодов не было критических повреждений и они восстанавливали свой ток утечки после сбрасывания напряжения. Возможно, это может быть связано с чрезвычайно высоким током утечки диодов с Ta анодом ($I_{UT} = 396$ мкА/мм), который десятикратно превышает ток утечки других рассматриваемых диодов. На рис. 6 представлена вольт-фарадная характеристика (ВФХ) полученных диодов.

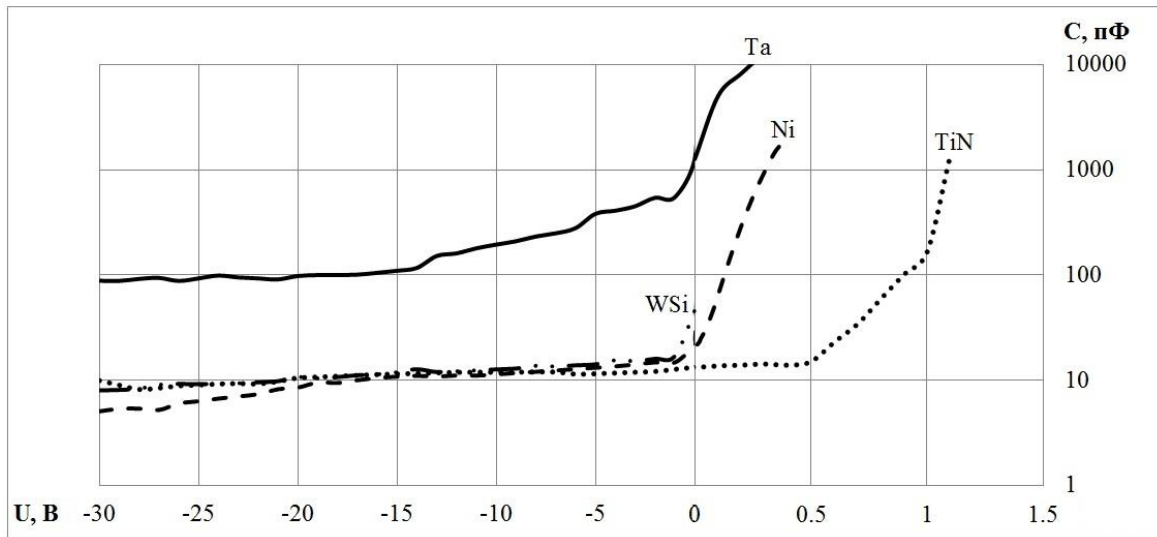


Рис. 6. Вольт-фарадная характеристика полученных диодов; $L_{A-K} = 7$ мкм, $W_A = 5$ мм, $F = 1$ МГц

Из рис. 6 видно, что диоды с Ni, WSi и TiN анодами обладают схожей ёмкостью ($C = 6\text{--}11$ пкФ). Ёмкость диодов с Ta анодом значительно отличается от ёмкости других рассматриваемых диодов, превышая её десятикратно ($C = 90\text{--}250$ пкФ).

4. Обсуждение результатов

AlGaIn/GaN диоды с анодами на основе Ni и WSi обладают привлекательными характеристиками. Относительно большие токи прямого смещения ($I^{Ni} = 55$ мА/мм, $I^{WSi} = 20$ мА/мм, $L_{A-K} = 7$ мкм) при $U = 1.2$ В, малые токи утечки ($I_{UT}^{Ni} = 13$ мкА/мм, $I_{UT}^{WSi} = 5$ мкА/мм), большие напряжения пробоя ($U_{ПП}^{Ni} = 300$ В, $U_{ПП}^{WSi} = 355$ В, $L_{A-K} = 7$ мкм) и малая ёмкость ($C \approx 1,6$ пкФ/мм) делают данные материалы анодов перспективными для силовых применений. Диоды с анодами на основе TiN обладают чрезвычайно малыми токами утечки ($I_{UT}^{TiN} = 0.85$ мкА/мм), большим напряжением пробоя ($U_{ПП}^{TiN} = 340$ В, $L_{A-K} = 7$ мкм) и малой ёмкостью ($C \approx 1,6$ пкФ/мм), но большое напряжение включения ($U_{ОТКР} = 1.6$ В по уровню $I = 1$ мА/мм) и, как следствие, очень малые токи прямого смещения ($I^{TiN} = 0.16$ мА/мм при $U = 1.2$ В) нивелируют все преимущества. Диоды с анодом на основе Ta обладают наибольшим током прямого смещения ($I^{Ta} = 68.5$ мА/мм при $U = 1.2$ В), но отсутствие явного пробоя, очень высокие токи утечки ($I_{UT}^{Ta} = 400$ мкА/мм) и большая ёмкость не позволят создать на их основе высокочастотные энергоэффективные приборы.

5. Заключение

Мощные GaN ДБШ могут быть очень полезны в устройствах преобразовательной техники. Разработка высокочастотных AlGaIn/GaN диодов с высокими токами прямого смещения, низкими токами утечки и высоким напряжением пробоя является перспективной задачей для силовой электроники. В данной работе представлены горизонтальные GaN ДБШ с анодами на основе Ta, Ni, WSi и TiN. Наиболее перспективными материалами для барьера Шоттки оказались Ni и WSi. Данные диоды обладают хорошим балансом между током утечки и прямыми токами. Диоды с TiN анодами обладают высоким напряжением открывания и низкими токами утечки. Диоды с Ta анодами обладают очень высокими токами утечки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.577.21.0250 от 26.09.17, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0250).

Литература

1. *Seikoh Yoshida, Nariaki Ikeda, Jiang Li, Takahiro Wada, Hiroshi Kambayashi, and Hironari Takehara.* High power AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diode with 1000 V operation // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2006. V. 892. P. 0892-FF05-02.1-0892-FF05-02.6.
2. *Seung-Chul LEE, Min-Woo HA, Ji-Yong LIM, Jin-Cherl HER, Kwang-Seok SEO and Min-Koo Han.* Suppression of Leakage Current of Ni/Au Schottky Barrier Diode Fabricated on Al-GaN/GaN Heterostructure by Oxidation // Jap. Journ. of Appli. Phys. 2006. V. 45, № 4B. P. 3398–3400.
3. *Cao Dong-Sheng, Lu Hai, Chen Dun-Jun, Han Ping, Zhang Rong, Zheng You-Dou.* A 1100+ V AlGaIn/GaN-Based Planar Schottky Barrier Diode without Edge Termination // Chin. Phys. Lett. 2011. V. 28. P. 017303-1–017303-4.
4. *Xing Lu, Chao Liu, Huaxing Jiang, Xinbo Zou, Anping Zhang, and Kei May Lau.* Ultralow reverse leakage current in AlGaIn/GaN lateral Schottky barrier diodes grown on bulk GaN substrate // Appl. Phys. Expr. 2016. V. 9, №. 5. P. 031001-1–031001-4.
5. *Saitoh Y. et al.* Extremely low on-resistance and high breakdown voltage observed in vertical GaN Schottky barrier diodes with high-mobility drift layers on low-dislocation-density GaN substrates // Appl. Phys. Exp. 2010. V. 3, №. 8. P. 081001-1–081001-3.
6. *Zhu M., Song B., Qi V., Hu Z., Nomoto K, Yan X., Cao Y., Johnson W., Kohn E., Jena D.* 1.9-kV AlGaIn/GaN Lateral Schottky Barrier Diodes on Silicon // IEEE El. Dev. Lett. 2015. V. 36, №. 4. P. 375–377.
7. *Treidel E. B. et al.* Fast GaN based Schottky diodes on Si(111) substrate with low onset voltage and strong reverse blocking // Phys. Status Solidi C. 2013. V. 10, №. 5. P. 849–852.
8. *Chen W. et al.* High-performance AlGaIn/GaN lateral field-effect rectifiers compatible with high electron mobility transistors // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92, №. 25. P. 253501-1–253501-3.
9. *Wang Y. et al.* Ultra-low leakage and high breakdown Schottky diodes fabricated on free-standing GaN substrate // Semicond. Sci. Technol. 2011. V. 26, №. 2. P. 022002.
10. *Hashimoto S. et al.* High-purity GaN epitaxial layers for power devices on low-dislocation-density GaN substrates // J. Cryst. Growth. 2007. V. 298. P. 871–874.
11. *Zhang Y. et al.* GaN-on-Si vertical Schottky and p-n diodes // IEEE Electron Device Lett. 2014. V. 35, №. 6. P. 618–620.
12. *Lee J.-H. et al.* AlGaIn/GaN-based lateral-type Schottky barrier diode with very low reverse recovery charge at high temperature // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. V. 60, №. 10. P. 3032–3039.
13. *Kamada A. et al.* High-voltage AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes on Si substrate with low-temperature GaN cap layer for edge termination // 20th Int. Symp. Power Semiconductor Devices IC's. 2008. P. 225–228.
14. *Boles T. et al.* >1200 V GaN-on-silicon Schottky diode // Phys. Status Solidi C. 2013. V. 10, №. 5. P. 835–839.
15. *Lian Y.-W. et al.* AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes on silicon substrates with selective Si diffusion for low onset voltage and high reverse blocking // IEEE Electron Device Lett. 2013. V. 34, №. 8. P. 981–983.
16. *Hilt O., Brunner F, Cho E., Knauer A., Bahat-Treidel E., Wurfl J.* Normally-off high voltage p-GaN gate GaN HFET with carbon-doped buffer // Proceeding of the 23rd International symposium on power semiconductor devices and IC. San Diego, May 23-26, 2011. P. 239–242.

Федин Иван Владимирович

инженер АО НПФ «Микран» (634041, Томск, пр. Кирова, 51Д), e-mail: fedinivanvladimirovich@mail.ru.

Ерофеев Евгений Викторович

к.т.н., м.н.с. НИИСЭС ТУСУР (634050, Томск, пр. Ленина, 40), e-mail: erofeev@sibmail.com.

Федина Валерия Васильевна

аспирант кафедры физической электроники ТУСУР, e-mail: lerochka_2009@mail.ru.

Parameters calculation of a logical channel for a secondary user in a group of two AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes with Ta, Ni, WSi and TiN anodes

I. Fedin, E. Erofeev, V. Fedina

In this paper, AlGaIn/GaN lateral Schottky barrier diodes (SBD) with anodes based on Ta, Ni, WSi and Ta are considered. Heterostructure AlGaIn/i-GaN/buffer GaN was grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) on silicon (111) substrate. All diodes had 5 nm (50%) anodes recess. Anode-cathode distance was varied from 3 to 7 μm . Diodes periphery (anodes width, W) was 10 mm. Diodes turn-ON voltage (by forward current 1 mA/mm) critically depends on anodes material and was 0.25 V, 0.45 V, 0.65 V and 1.6 V for Ta, Ni, WSi and TiN anodes respectively. Specific leakage current also depends on anodes material and was 67 $\mu\text{A}/\text{mm}$, 13 $\mu\text{A}/\text{mm}$, 5 $\mu\text{A}/\text{mm}$ and 0.85 $\mu\text{A}/\text{mm}$ for Ta, Ni, WSi and TiN respectively.

Keywords: GaN on silicon, AlGaIn/GaN, Schottky barrier diode, anode material.