ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОТЖИГА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, МОРФОЛОГИЮ И МИКРОСТРУКТУРУ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НА ОСНОВЕ Mo/Al/Mo/Au К ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ AlGaIn/GaN

М.Н. Кондаков^{1,2}, С.В. Черных^{1,2}, А.В. Черных^{1,2}, Д.А. Подгорный²,
Н.Б. Гладышева¹, А.А. Дорофеев¹, С.И. Диденко², Д.Б. Капров¹, Т.А. Жукова¹

¹АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27

²НИТУ «МИСиС», 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

Исследованы зависимости электрических параметров, морфологии и микроструктуры омических контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN от температуры отжига. Наилучшее значение контактного сопротивления составило $3,2 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² (0,11 Ом·мм) и было получено после быстрого отжига при температуре 700 °С. Изменение микроструктуры и морфологии контактов было исследовано методами Оже-электронной спектроскопии (ОЭС), растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Продемонстрирована гладкая морфология поверхности и ровная кромка контактов, имеющих оптимальные электрические параметры.

Ключевые слова: система металлизации Mo/Al/Mo/Au, омический контакт, гетероструктура AlGaIn/GaN, СВЧ HEMT.

Сведения об авторах: Кондаков Михаил Николаевич, kondakov_mn@pulsarnpp.ru; Черных Сергей Владимирович, s.v.chernykh@pulsarnpp.ru; Черных Алексей Владимирович, a.v.chernykh@pulsarnpp.ru; Подгорный Дмитрий Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент, podgorny_d@misis.ru; Гладышева Надежда Борисовна, gladysheva@pulsarnpp.ru; Дорофеев Алексей Анатольевич, dorofeev@pulsarnpp.ru; Диденко Сергей Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент, sdi13@mail.ru; Капров Дмитрий Борисович, kaprov_dmitriy@pulsarnpp.ru; Жукова Татьяна Александровна, zhukova_ta@pulsarnpp.ru

EFFECT OF ANNEALING CONDITIONS ON ELECTRICAL PROPERTIES, SURFACE MORPHOLOGY AND MICROSTRUCTURE OF Mo/Al/Mo/Au OHMIC CONTACTS ON AlGaIn/GaN HETEROSTRUCTURES

M.N. Kondakov^{1,2}, S.V. Chernykh^{1,2}, A.V. Chernykh^{1,2}, D.A. Podgorny², N.B. Gladysheva¹,
A.A. Dorofeev¹, S. I. Didenko², D.B. Kaprov¹, T.A. Zhukova¹

¹JSC «S&PE «Pulsar», 105187 Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

²NUST «MISIS», 119991 Moscow, Leninskiy prospekt, 4

The electrical properties, the surface morphology and the microstructure of Mo/Al/Mo/Au ohmic contacts on AlGaIn/GaN heterostructures at various annealing temperatures were investigated. The best value of specific contact resistivity of $3.2 \cdot 10^{-7}$ Ohm·cm² (0.11 Ohm·mm) was achieved after rapid thermal annealing at 700 °C. The contact microstructure and the surface morphology as a function of annealing temperature were studied using Auger electron spectroscopy (AES), scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The contacts with good electrical characteristics exhibited smooth surface morphology and edge acuity.

Keywords: Mo/Al/Mo/Au metallization scheme, ohmic contact, AlGaIn/GaN heterostructure, HEMT.

Authors: Kondakov Mikhail Nikolaevich, kondakov_mn@pulsarnpp.ru; Chernykh Sergey Vladimirovich, s.v.chernykh@pulsarnpp.ru; Chernykh Aleksey Vladimirovich, a.v.chernykh@pulsarnpp.ru; Podgorny Dmitry Andreevich, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, podgorny_d@misis.ru; Gladysheva Nadezhda Borisovna, gladysheva@pulsarnpp.ru; Dorofeev Aleksey Anatolyevich, dorofeev@pulsarnpp.ru; Didenko Sergey Ivanovich, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, sdi13@mail.ru; Kaprov Dmitry Borisovich, kaprov_dmitriy@pulsarnpp.ru; Zhukova Tatiana Aleksandrovna, zhukova_ta@pulsarnpp.ru

Введение

В настоящее время транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT – high electron mobility transistor) на основе гетероструктур AlGaIn/GaN широко используются в СВЧ электронике, работающей в экстремальных режимах эксплуатации.

В качестве омического контакта к гетероструктурам AlGaIn/GaN наиболее часто используется система металлизации Ti/Al/Ni/Au [1, 2]. Однако из-за того, что слой Ni при высокотемпературном отжиге является плохим диффузионным барьером для Al и Au, и вследствие этого образуются фазы Al-Au, данная система имеет недостатки, такие как высокая шероховатость поверхности и латеральное растекание металлизации контакта во время отжига [3]. В результате затрудняется процесс захвата знаков совмещения во время электронно-лучевой литографии, а также сильно ухудшаются параметры надёжности транзисторов и снижается выход годных приборов. На сегодняшний день для решения данной проблемы в качестве диффузионного барьера испробованы Ti, Ta, Pt, Ti-W, Nb, Mo и др. [4-8]. Показано, что использование Mo в качестве барьерного слоя позволяет получать сравнительно гладкую морфологию поверхности и ровную кромку омического контакта [9, 10].

Помимо этого, в периодической литературе встречаются работы, где в качестве

первого слоя системы металлизации омического контакта используются Ta, Cr, V, Hf, Mo и др. [12-15]. К сожалению, большинство систем металлизаций на основе этих металлов до сих пор в полной мере не изучено. В числе прочего было показано, что система металлизации на основе Mo имеет большие перспективы в получении низкоомного контакта с широким диапазоном температур отжига от 500 до 950 °C [16, 17]. По сравнению с контактами на основе стандартной системы металлизации Ti/Al/Ni/Au данная система может иметь больший диапазон применения [18, 19].

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния температуры отжига на электрические параметры, морфологию и микроструктуру контактов на основе системы металлизации Mo/Al/Mo/Au к нелегированным гетероструктурам AlGaIn/GaN.

Методика эксперимента

В ходе эксперимента были использованы три типа гетероэпитаксиальных структур (ГЭС), выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии на сапфировых подложках с кристаллографической ориентацией (0001). Следует отметить, что ГЭС1 и ГЭС2 были отечественного производства, а ГЭС3 – зарубежного. Конструкция слоёв и параметры двумерного электронного газа (ДЭГ) для этих структур представлены на рис. 1.

$R_{sh} = 295 \text{ Ом}/\square$ $n_s = 1.26 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ $\mu_n = 1700 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$R_{sh} = 325 \text{ Ом}/\square$ $n_s = 1.10 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ $\mu_n = 1760 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$R_{sh} = 380 \text{ Ом}/\square$ $n_s = 1.30 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ $\mu_n = 1225 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
i-Al _{0.28} Ga _{0.72} N, 26 нм	i-Al _{0.34} Ga _{0.66} N, 23 нм	i-GaN, 1.5 нм
AlN, 0.7 нм	AlN, 0.6 нм	i-Al _{0.3} Ga _{0.7} N, 20 нм
i-GaN, 2.5 мкм	i-GaN, 2.5 мкм	i-GaN, 2.3 мкм
Сапфир (0001)	Сапфир (0001)	Сапфир (0001)
ГЭС1	ГЭС2	ГЭС3

Рис. 1

Конструкции слоёв и параметры ДЭГ гетероструктур

Электрические параметры (переходное контактное сопротивление ρ_c и контактное сопротивление R_c) омических контактов измерялись методом длинной линии (TLM – transmission line method). TLM-структуры имели 7

прямоугольных контактных площадок размером 50×100 мкм, расположенных друг от друга на расстоянии 3, 6, 12, 18, 24 и 30 мкм.

Изготовление TLM-структур начиналось с изоляции активной области посред-

ством формирования меза-структуры методом реактивного ионно-лучевого травления в атмосфере C_3H_8 . Контактные площадки формировались с помощью взрывной фотолитографии. Непосредственно перед напылением металлизации проводилась обработка поверхности в водном растворе HCl ($HCl:H_2O = 1:1$) в течение 60 с. Слои металлов напылялись в установке УВН-2М методами термического (Al, Au) и магнетронного (Mo) распыления. Толщины слоёв систем металлизации Mo/Al/Mo/Au (10/60/55/50 нм), используемые в настоящей работе, были определены в [20]. Быстрый термический отжиг образцов проводился в диапазоне температур от 500 до 900 °C в течение 30 с в атмосфере азота.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились при комнатной температуре с помощью анализатора характеристик полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Микроскопические изображения поверхности контактов были получены методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Элементный состав по площади контактов после отжига исследовался методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Изучение микроструктуры контактов проводилось методом Оже-электронной спектроскопии (ОЭС). Измерения проводились на Оже-электронном спектрометре Physical Electronic PHI 680. Распыление осуществлялось ионами Ar с энергией 2 кэВ под углом к поверхности 30°. ОЭС-профили были получены при ускоряющем напряжении электронов 10 кэВ при токе пучка 10 нА.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 (а, б, в) приведены зависимости ВАХ контактов к трём типам ГЭС от темпе-

ратуры отжига. Измерения ВАХ проводились между контактными площадками ТЛМ-структур, расположенными на расстоянии 6 мкм. Видно, что для ГЭС1 ВАХ контактов, отожжённых при температурах менее 700 °C, нелинейны, а после отжига при более высоких температурах (вплоть до 900 °C) ВАХ контактов имеют омическое поведение. Для ГЭС2 и ГЭС3 ВАХ контактов демонстрировали линейное поведение при температурах отжига выше 600 °C. Следует отметить, что для получения более низкотемпературных омических контактов необходима обработка поверхности полупроводника в хлорной плазме, как было показано в работах [16, 17].

Зависимость ρ_c от температуры отжига для трёх типов ГЭС приведена на рис. 2г. Минимальные значения ρ_c для ГЭС1, ГЭС2 и ГЭС3 составили $3,5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см² ($R_c = 0,93$ Ом·мм) при 750 °C, $1,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² ($R_c = 0,24$ Ом·мм) при 750 °C и $3,2 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² ($R_c = 0,11$ Ом·мм) при 700 °C соответственно. Следует отметить, что полученные результаты хорошо коррелируют с толщиной барьерного слоя AlGaIn. Известно, что если преобладающим механизмом токопереноса через омический контакт к гетероструктуре AlGaIn/GaN является механизм туннелирования, то контактное сопротивление должно зависеть от толщины слоя AlGaIn [21]. Помимо этого, такое различие электрических параметров может быть связано с наличием для ГЭС1 и ГЭС2 тонкого промежуточного слоя AlN. Наличие данного слоя позволяет улучшить параметры ДЭГ, однако одновременно с этим из-за плохой воспроизводимости и неравномерности процесса роста это может приводить к ухудшению сопротивления омических контактов [22].

Зависимости ВАХ (а, б, в) и ρ_c (г) контактов на основе системы Mo/Al/Mo/Au к трём типам гетероструктур от температуры отжига

Морфология омических контактов в зависимости от температуры быстрого отжига для всех трёх типов ГЭС практически не отличалась. На рис. 3 приведены РЭМ-изображения морфологии контактов, сформированных к ГЭС3. Все образцы имели относительно ровную кромку. Контакты, отожжённые при 500 и 550 °С, демонстрировали локальные изменения морфологии – на поверхности контактов появлялись участки с сильным перемешиванием металлов, площади которых увеличивались с повышением температуры. При температурах выше 600 °С наблюдалось изменение морфологии по всей площади контактных площадок. Контакты, отожжённые при 650 °С,

имели выпуклые области с размерами в пределах 10 мкм. С помощью ЭДС-анализа в их составе было обнаружено преобладающее содержание Al и Au (рис. 4). После отжига при 700 °С размеры этих областей уменьшились более чем в два раза. При дальнейшем повышении температуры отжига наблюдалось постепенное уменьшение их количества и при 900 °С они полностью исчезли. Также следует отметить, что для контактов, отожжённых при температурах свыше 700 °С, наблюдались небольшие области без слоя металлизации. Несмотря на это, полученные омические контакты продемонстрировали приемлемую морфологию поверхности и кромки.

Изменение морфологии контактов на основе системы Mo/Al/Mo/Au к ГЭС3 в зависимости от температуры отжига: 500 °С (а); 550 °С (б); 600 °С (в); 650 °С (г); 700 °С (д); 750 °С (е); 800 °С (ж); 850 °С (з); 900 °С (и)

Рис. 4

ЭДС-карта элементного состава по площади металлизации контактов на основе системы Mo/Al/Mo/Au, отожжённых при температурах 650 °C (а), 700 °C (б), 750 °C (в), 800 °C (г), 850 °C (д) и 900 °C (е); РЭМ-изображения были получены с помощью детекторов вторичных и обратно отражённых электронов

В дальнейшем для исследования микроструктуры были измерены элементные ОЭС-профили по глубине для контактов (ГЭС2), отожжённых при температуре 650, 700 и 750 °C, а также для неотожжённого контакта. Полученные результаты представлены на рис. 5. Как видно, для неотожжённого образца слои Mo, Al, Au и гетероструктуры AlGaIn/GaN хорошо различимы (рис. 5а). Помимо этого, на границах слоёв металлов и поверхности полупроводника обнаружено наличие кислорода, что обусловлено особенностями использованного напылительного оборудования.

Полученные ОЭС-профили отожжённых контактов продемонстрировали сильное перемешивание слоёв металлов (рис. 5б, в, г).

Необходимо отметить, что из-за отличия скоростей распыления различных фаз и развитой вследствие этого шероховатости поверхности (см. рис. 5 вставки) невозможно получение точного профиля элементного состава по глубине. Исходя из этого, сильно затруднена оценка степени впаивания металлизации в полупроводник. Однако наличие чёткого профиля Al, находящегося в тройном соединении AlGaIn, указывает на то, что заметного впаивания металла не произошло.

Для контакта, отожжённого при 650 °C, наблюдались существенная диффузия Au к границе раздела металл-полупроводник и небольшая диффузия Al в сторону поверхности. При температурах отжига более

650 °C было обнаружено распределение Al и Au по всему слою металлизации. При этом наблюдалось заметное содержание O на поверхности, однако с увеличением глубины его содержание быстро уменьшалось. Этот факт можно связать с окислением Al на поверхности в процессе отжига.

Исходя из формы ОЭС-профилей Mo, было показано, что после отжига при 700 °C слой Mo перестаёт быть целостным. Это совпадает с результатами работы [22], в которой было обнаружено, что для системы металлизации Ti/Al/Mo/Au после отжига при этой же температуре слой Mo распадается на равноосные зерна, состоящие из Mo и Al (16 %).

В предыдущей работе [20] было предположено, что образование фаз $GaMo_3$ и Al_xMo_y играет важную роль при формировании омического контакта, а образование фазы

Al_2Au ответственно за ухудшение морфологии поверхности. Данные выводы хорошо согласуются с результатами, полученными в настоящей работе:

- наилучшие электрические параметры были получены для контактов, отожжённых при 700 и 750 °C, для которых предположительно наблюдается нарушение целостности барьерного слоя Mo;

- выпуклые области на поверхности отожжённой металлизации имеют преобладающее содержание Al и Au.

Для дальнейшего понимания механизма формирования омических контактов на основе Mo/Al/Mo/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN будут проведены детальные исследования методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии.

Рис. 5

ОЭС-профили элементного распределения по глубине неотожжённого контакта на основе системы Mo/Al/Mo/Au (а) и контактов, отожжённых при температурах 650 °C (б), 700 °C (в) и 750 °C (г); во вставках приведены РЭМ-изображения до и после распыления

Заклучение

Исследовано влияние температуры отжига на характеристики омических контактов на основе Mo/Al/Mo/Au к нелегированным гетероструктурам AlGaIn/GaN. Наилучшие значения контактного сопротивления были получены при 700–750 °С и для ГЭСЗ были равны $3,2 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² (0,11 Ом·мм).

Исследования микроструктуры и морфологии поверхности контактов методами Оже-электронной спектроскопии, растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии в зависимости от температуры отжига показали:

– наличие на поверхности контакта, отожженного при 650 °С, выпуклых областей с преобладающим содержанием Al и Au. Размеры и количество этих областей уменьшались с повышением температуры отжига. Для контактов, отожженных при температурах более 700 °С, наблюдались небольшие области без слоя металлизации;

– во время отжига происходит сильное перемешивание слоёв металлов: при 650 °С происходила взаимная диффузия Al и Au, начиная с 700 °С наблюдалось распределение Mo, Al и Au по всей толщине слоя металлизации.

Исследования микроструктуры контакта проведены на оборудовании ЦКП “Материаловедение и металлургия” НИТУ МИСиС при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

1. Whiting P. G. et al. Nanocrack formation in Al-GaN/GaN high electron mobility transistors utilizing Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts // *Microelectronics Reliability*. – 2017. – Т. 70. – pp. 41-48.
2. Wang C. et al. Optimization of ohmic contact for AlGaInGaN HEMT by introducing patterned etching in ohmic area // *Solid-State Electronics*. – 2017. – Т. 129. – pp. 114-119.
3. Xin H. P. et al. Optimization of AlGaIn/GaN HEMT Ohmic Contacts for Improved Surface Morphology with Low Contact Resistance // *CS MANTECH Conf. (Portland, OR)*. – 2010. – pp. 149-152.
4. Davydov A. V. et al. Combinatorial optimization of Ti/Al/Ti/Au ohmic contacts to n-GaN // *Phys. Stat. Sol. (c)*. – 2005. – №. 7. – pp. 2551-2554.
5. Wang C. et al. Electrical characterization and nanoscale surface morphology of optimized Ti/Al/Ta/Au ohmic contact for AlGaIn/GaN HEMT // *Nanoscale research letters*. – 2005. – Т. 7. – №. 1. – p. 107.
6. Hou M. et al. Operation of ohmic Ti/Al/Pt/Au multilayer contacts to GaN at 600°C in air // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Т. 105. – p. 081905.
7. Fernández S. et al. Low resistance Ti/Al/Ti-W/Au Ohmic contact to n-GaN for high temperature applications // *Applied Physics Letters*. – 2007. – Т. 90. – p. 083504.
8. Nakayama T. et al. Low-contact-resistance and smooth-surface Ti/Al/Nb/Au ohmic electrode on AlGaIn/GaN heterostructure // *Applied Physics Letters*. – 2004. – Т. 85. – p. 3775.
9. Mohammed F. M. et al. The role of barrier layer on Ohmic performance of Ti/Al-based contact metalizations on AlGaIn/GaN heterostructures // *J. Applied Physics*. – 2006. – Т. 100. – p. 023708.
10. Kumar V. Thermally-stable low-resistance Ti/Al/Mo/Au multilayer ohmic contacts on n-GaN // *J. Applied Physics*. – 2002. – Т. 92. – p. 1712.
11. Gillespie J. et al. AlGaIn/GaN ohmic contact resistance variations across epitaxial suppliers // *Solid-State Electronics*. – 2005. – Т. 49. – pp. 670-672.
12. Pooth A. et al. Morphological and electrical comparison of Ti and Ta based ohmic contacts for Al-GaN/GaN-on-SiC HFETs // *Microelectronics Reliability*. – 2017. – Т. 68. – pp. 2-4.
13. Papanicolaou N. A. et al. Cr/Al and Cr/Al/Ni/Au ohmic contacts to n-type GaN // *J. Applied Physics*. – 2000. – Т. 87. – p. 380.
14. Nagata N. et al. Reduction of contact resistance in V-based electrode for high AlN molar fraction n-type AlGaIn by using thin SiNx intermediate layer // *Physica status solidi (c)*. – 2016. – pp. 1-4.
15. Liu Y. et al. Low resistivity Hf/Al/Ni/Au Ohmic Contact Scheme to n-Type GaN // *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*. – 2012. – №. 69.
16. Basu A. et al. Mo/Al/Mo/Au Ohmic contact scheme for Al_xGa_{1-x}N/GaN high electron mobility transistors annealed at 500 °C // *J. Vac. Sci. Technol. B*. – 2006. – Т. 24. – №. 2. – pp. L16-L18.
17. Selvanathan D. et al. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures // *Journal of vacuum science and technology B microelectronics and nanometer structures*. – 2004. – Т. 22. – №. 5. – pp. 2409-2416.
18. Lee J. et al. Low resistance Mo/Al/Mo/Au ohmic contact scheme to InAlN/AlN/GaN heterostructure // *Physica status solidi (a)*. – 2011. – Т. 208. – №. 7. – pp. 1538-1540.
19. Ando Y. et al. Electron transport mechanism for ohmic contact to GaN/AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors // *Electron Devices, IEEE Transactions on*. – 2013. – Т. 60. – №. 9. – pp. 2788-2794.

20. M. N. Kondakov et al. Mo/Al/Mo/Au based ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures // Russian Microelectronics. – 2016. – T. 45. – № 6. – pp. 402-409.
21. Qiao D. Transport properties of the advancing interface ohmic contact to AlGaIn/GaN heterostructures // Applied Physics Letters. – 2002. – T. 80. – p. 992.
22. Shriki A. et al. Formation mechanism of gold-based and gold-free ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors // Journal of applied physics. – 2017. – T. 121. – p. 065301.
23. Wang L. et al. Formation mechanism of Ohmic contacts on AlGaIn/GaN heterostructure: Electrical and microstructural characterizations // Applied Physics Letters. – 2008. – T. 103. – p. 093516.
10. Kumar V. Thermally-stable low-resistance Ti/Al/Mo/Au multilayer ohmic contacts on n-GaN // J. Applied Physics. – 2002. – T. 92. – p. 1712.
11. Gillespie J. et al. AlGaIn/GaN ohmic contact resistance variations across epitaxial suppliers // Solid-State Electronics. – 2005. – T. 49. – pp. 670-672.
12. Pooth A. et al. Morphological and electrical comparison of Ti and Ta based ohmic contacts for AlGaIn/GaN-on-SiC HFETs // Microelectronics Reliability. – 2017. – T. 68. – pp. 2-4.
13. Papanicolaou N. A. et al. Cr/Al and Cr/Al/Ni/Au ohmic contacts to n-type GaN // J. Applied Physics. – 2000. – T. 87. – p. 380.
14. Nagata N. et al. Reduction of contact resistance in V-based electrode for high AlN molar fraction n-type AlGaIn by using thin SiNx intermediate layer // Physica status solidi (c). – 2016. – pp. 1-4.
15. Liu Y. et al. Low resistivity Hf/Al/Ni/Au Ohmic Contact Scheme to n-Type GaN // Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – №. 69.
16. Basu A. et al. Mo/Al/Mo/Au Ohmic contact scheme for Al_xGa_{1-x}N/GaN high electron mobility transistors annealed at 500 °C // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2006. – T. 24. – №. 2. – pp. L16-L18.
17. Selvanathan D. et al. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures // Journal of vacuum science and technology B microelectronics and nanometer structures. – 2004. – T. 22. – №. 5. – pp. 2409-2416.
18. Lee J. et al. Low resistance Mo/Al/Mo/Au ohmic contact scheme to InAlN/AlN/GaN heterostructure // Physica status solidi (a). – 2011. – T. 208. – №. 7. – pp. 1538-1540.
19. Ando Y. et al. Electron transport mechanism for ohmic contact to GaN/AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors // Electron Devices, IEEE Transactions on. – 2013. – T. 60. – №. 9. – pp. 2788-2794.
20. M. N. Kondakov et al. Mo/Al/Mo/Au based ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures // Russian Microelectronics. – 2016. – T. 45. – № 6. – pp. 402-409.
21. Qiao D. Transport properties of the advancing interface ohmic contact to AlGaIn/GaN heterostructures // Applied Physics Letters. – 2002. – T. 80. – p. 992.
22. Shriki A. et al. Formation mechanism of gold-based and gold-free ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors // Journal of applied physics. – 2017. – T. 121. – p. 065301.
23. Wang L. et al. Formation mechanism of Ohmic contacts on AlGaIn/GaN heterostructure: Electrical and microstructural characterizations // Applied Physics Letters. – 2008. – T. 103. – p. 093516.

References

1. Whiting P. G. et al. Nanocrack formation in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors utilizing Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts // Microelectronics Reliability. – 2017. – T. 70. – pp. 41-48.
2. Wang C. et al. Optimization of ohmic contact for AlGaIn/GaN HEMT by introducing patterned etching in ohmic area // Solid-State Electronics. – 2017. – T. 129. – pp. 114-119.
3. Xin H. P. et al. Optimization of AlGaIn/GaN HEMT Ohmic Contacts for Improved Surface Morphology with Low Contact Resistance // CS MANTECH Conf. (Portland, OR). – 2010. – pp. 149-152.
4. Davydov A. V. et al. Combinatorial optimization of Ti/Al/Ti/Au ohmic contacts to n-GaN // Phys. Stat. Sol. (c). – 2005. – №. 7. – pp. 2551-2554.
5. Wang C. et al. Electrical characterization and nanoscale surface morphology of optimized Ti/Al/Ta/Au ohmic contact for AlGaIn/GaN HEMT // Nanoscale research letters. – 2005. – T. 7. – №. 1. – p. 107.
6. Hou M. et al. Operation of ohmic Ti/Al/Pt/Au multilayer contacts to GaN at 600°C in air // Applied Physics Letters. – 2014. – T. 105. – p. 081905.
7. Fernández S. et al. Low resistance Ti/Al/Ti-W/Au Ohmic contact to n-GaN for high temperature applications // Applied Physics Letters. – 2007. – T. 90. – p. 083504.
8. Nakayama T. et al. Low-contact-resistance and smooth-surface Ti/Al/Nb/Au ohmic electrode on AlGaIn/GaN heterostructure // Applied Physics Letters. – 2004. – T. 85. – p. 3775.
9. Mohammed F. M. et al. The role of barrier layer on Ohmic performance of Ti/Al-based contact metallizations on AlGaIn/GaN heterostructures // J. Applied Physics. – 2006. – T. 100. – p. 023708.