

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ Mo/Al/Mo/Au В КАЧЕСТВЕ ОМИЧЕСКОГО КОНТАКТА К ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ AlGaIn/GaN

© М. Н. Кондаков^{1,2}, С. В. Черных^{1,2}, Н. Б. Гладышева¹, А. В. Черных^{1,2},
А. А. Дорофеев¹, С. И. Диденко², К. Д. Щербачев², Н. Ю. Табачкова²,
Ф. М. Барышников^{1,2}

¹ОАО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

²НИТУ «МИСиС», 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4

Исследована система металлизации Mo/Al/Mo/Au с целью создания омического контакта к гетероструктурам AlGaIn(нл)/GaN. Получены зависимости параметров контакта от температуры (в диапазоне 600-950 °С) и времени быстрого термического отжига (в диапазоне 20-170 с) в атмосфере азота. Определён оптимальный температурно-временной режим отжига контакта – 800 °С в течение 30 с. В данном режиме было исследовано влияние соотношений толщин слоёв металлов на параметры контакта. Для оптимизированной системы Mo(10 нм)/Al(60 нм)/Mo(50 нм)/Au(50 нм) лучшее значение переходного контактного сопротивления составило $4,7 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ (0,14 Ом·мм). Представлены результаты исследований микроструктуры омического контакта методами растровой электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Омические контакты на основе данной системы металлизации продемонстрировали хорошую термостабильность при 500 °С в течение 100 ч.

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

Сведения об авторах: Кондаков Михаил Николаевич, аспирант, kondakovmix@mail.ru; Черных Сергей Владимирович, chsv_84@mail.ru; Гладышева Надежда Борисовна, gladysheva@pulsarnpp.ru; Черных Алексей Владимирович, chav_84@mail.ru; Дорофеев Алексей Анатольевич, dorofeev@pulsarnpp.ru; Диденко Сергей Иванович, к.ф.-м.н., доцент, sdi13@mail.ru; Щербачев Кирилл Дмитриевич, к.ф.-м.н., доцент, chterb@mail.ru; Табачкова Наталия Юрьевна, к.ф.-м.н., доцент, ntabachkova@gmail.com; Барышников Федор Михайлович, baryshnikovfm@pulsarnpp.ru

INVESTIGATION OF Mo/Al/Mo/Au METALLIZATION SCHEME AS AN OHMIC CONTACT TO AlGaIn/GaN HETEROSTRUCTURES

M. N. Kondakov^{1,2}, S. V. Chernykh^{1,2}, N. B. Gladysheva¹, A. V. Chernykh^{1,2},
A. A. Dorofeev¹, S. I. Didenko², K. D. Scherbachev², N. Yu. Tabachkova²,
F. M. Baryshnikov^{1,2}

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

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

A Mo/Al/Mo/Au metallization scheme was investigated to form an ohmic contact to undoped-AlGaIn/GaN heterostructures. Dependences of the contact parameters on the temperature (from 600 to 950 °C) and time (from 20 to 170 s) of rapid thermal annealing in nitrogen ambient were obtained. The optimal annealing temperature-time condition was determined at 800 °C for 30 s. This condition was used to investigate the influence of thickness ratios of the metal layers on the ohmic contact parameters. For the optimized metallization scheme consisting of Mo(10 nm)/Al(60 nm)/Mo(50 nm)/Au(50 nm) the best value of the specific contact resistance was $4,7 \cdot 10^{-7} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ (0,14 $\Omega \cdot \text{mm}$). Results of the ohmic contact microstructure investigation using scanning electron microscopy and x-ray diffraction analysis are presented. The ohmic contacts based on the proposed metallization scheme showed good thermal stability at 500 °C for 100 h.

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

Data of authors: Kondakov Mikhail Nikolaevich, postgraduate, kondakovmix@mail.ru; Chernykh Sergey Vladimirovich, chsv_84@mail.ru; Gladysheva Nadezhda Borisovna, gladysheva@pulsarnpp.ru; Chernykh Aleksey Vladimirovich, chav_84@mail.ru; Dorofeev Aleksey Anatolyevich, dorofeev@pulsarnpp.ru; Didenko Sergey Ivanovich, Ph.D., Associate Professor, sdi13@mail.ru; Scherbachev Kirill Dmitrievich, Ph.D., Associate Professor, chterb@mail.ru; Tabachkova Nataliya Yuryevna, Ph.D., Associate Professor, ntabachkova@gmail.com; Baryshnikov Fedor Mikhailovich, baryshnikovfm@pulsarnpp.ru

Введение

В настоящее время транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе GaN (HEMT – high electron mobility transistor) широко применяются в сверхвысокочастотной, высокоомощной и высокотемпературной электронике [1-2]. Одной из немаловажных составляющих при разработке HEMT на AlGaIn/GaN является технология формирования омических контактов. К омическим контактам предъявляются требования по величине контактного сопротивления, морфологии, качеству кромки контакта, термостабильности и др. Создание омических контактов, удовлетворяющих вышеперечисленным требованиям, до сих пор является предметом исследований [3-5].

На сегодняшний день существуют различные способы улучшения параметров омических контактов к AlGaIn/GaN гетероструктурам, например, выращивание сильнолегированного слоя полупроводника в подконтактной области [6-7], использование плазменной обработки поверхности полупроводника перед напылением металлизации [8], использование защитного диэлектрического слоя во время быстрого термического отжига контактов [9], подпыление тонкого слоя Si для подлегирования полупроводника [10] и др.

В качестве металлизации омического контакта к GaN широко используется система Ti/Al/Ni/Au [3, 11]. Недостатком данной системы является высокая шероховатость поверхности из-за сильного смешивания Au с Al. Также существуют исследования, где в качестве контактной металлизации использовались системы Ti/Al/Mo/Au, Ti/Al/Ti/Au, V/Al/Mo/Au, Ta/Al/Ni/Au, Hf/Al/Ni/Au, Mo/Al/Mo/Au и др. [12-17]. Среди преимуществ последней стоит выделить возможность получения

низких значений контактного сопротивления (менее 0,4 Ом·мм) в широком диапазоне температур быстрого термического отжига от 650 °C до 950 °C [18]. Также в работе [17] сообщается о возможности получения низкоомного омического контакта на основе системы Mo/Al/Mo/Au при температуре отжига 500 °C, что позволяет использовать данную систему при изготовлении приборов по самосовмещённой технологии. Однако из-за широкого интереса к системе Ti-Al, на данный момент работ по технологическим особенностям формирования контактов на основе системы Mo/Al/Mo/Au в периодической литературе сравнительно мало [17-20].

В настоящей работе представлены результаты исследования системы металлизации Mo/Al/Mo/Au в качестве омических контактов к гетероструктурам AlGaIn(нл)/GaN.

1. Методика эксперимента

В эксперименте использовались эпитаксиальные гетероструктуры двух конструкций. Состав и толщины слоёв представлены на рис. 1.

Для эпитаксиальной гетероструктуры № 1 (ЭГС1) значение слоевого сопротивления, измеренного бесконтактным вихретоковым методом, составило 295 Ом/□. Значения слоевой концентрации и подвижности электронов в двумерном электронном газе, измеренные методом Холла, составили соответственно $1,26 \cdot 10^{13}$ см⁻² и 1700 см²/(В·с). Для эпитаксиальной гетероструктуры № 2 (ЭГС2) соответствующие параметры двумерного электронного газа (ДЭГ) равнялись 380 Ом/□, $1,3 \cdot 10^{13}$ см⁻² и 1225 см²/(В·с).

Для измерения переходного контактного сопротивления ρ_k и контактного сопротивления R_k использовался метод длинной линии (TLM – Transmission Line Method). Тестовые TLM

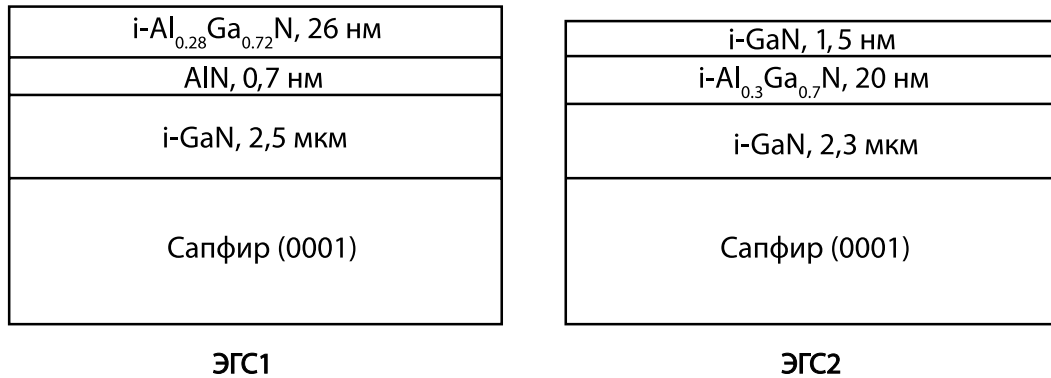


Рис. 1

Конструкции слоёв гетероструктур, использованных в эксперименте

структуры имели контактные площадки прямоугольной формы (30x100 мкм), расстояния между которыми составляли соответственно 8, 11, 40 и 100 мкм. Также в ходе эксперимента контролировался ток насыщения $I_{нас}$, который измерялся на отдельной тестовой структуре с расстоянием между контактами 4 мкм.

Процесс изготовления тестовых структур начинался с обработки подложек для удаления органических загрязнений с поверхности. Формирование рисунков контактных площадок проводилось с использованием взрывной фотолитографии. Меза-структуры формировались методом реактивного ионно-лучевого травления в атмосфере C_3F_8 . Перед напылением металлизации для удаления поверхностного окисла подложки обрабатывались в растворе $HCl:HF:H_2O$ (1:1:30). Напыление металлов осуществлялось методами магнетронного (Mo) и термического (Al, Au) распыления. Исходные толщины слоёв системы Mo/Al/Mo/Au были соответственно 10 нм/40 нм/40 нм/40 нм, где толщины первых двух слоёв были выбраны в соответствии с работой [17].

Для отработки режимов формирования омического контакта использовались ЭГС1, выращенные в одном ростовом процессе. Первоначально определялись зависимости параметров контакта от температуры $T_{отж}$ (600-950 °C) и времени $t_{отж}$ (20-170 с) быстрого термического отжига. Затем для оптимального режима отжига исследовалось влияние толщин слоёв металлизации на параметры контакта. Полученный омический контакт испытывался на термостабильность при температуре 500 °C в течение

100 часов. Также проводилось сравнение электрических параметров оптимизированного омического контакта, сформированного на обоих типах конструкций ЭГС.

Вольт-амперные характеристики измерялись с помощью анализатора характеристик полупроводниковых приборов Agilent B1500A.

Микроскопические изображения были получены с помощью двухлучевой системы Helios NanoLab 450 F1, производства FEI. Травление образца проводилось пучком ионов галлия с энергией 30 кэВ при токе 6,5 нА с последующей шлифовкой при 0,1 нА. После травления полученный профиль измерялся методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Значения ускоряющего напряжения и тока пучка составляли соответственно 10 кВ и 0,2 нА.

Для исследования межфазных соединений, образующихся при формировании омического контакта, был использован метод рентгеновской дифрактометрии. Измерения проводились на многоцелевом рентгеновском дифрактометре D8 Discover (фирма Bruker-AXS, Германия). Измерения выполнялись в геометрии $2\theta-\omega$. Дифрактограммы обрабатывались в программе EVA (Bruker-AXS) с базой данных химических соединений ICDD PDF-2 (2004).

2. Результаты и обсуждение

2.1. Режим отжига

На рис. 2а представлены зависимости ρ_k и $I_{нас}$ от температуры отжига в диапазоне от 600 до 950 °C для исходной системы метал-

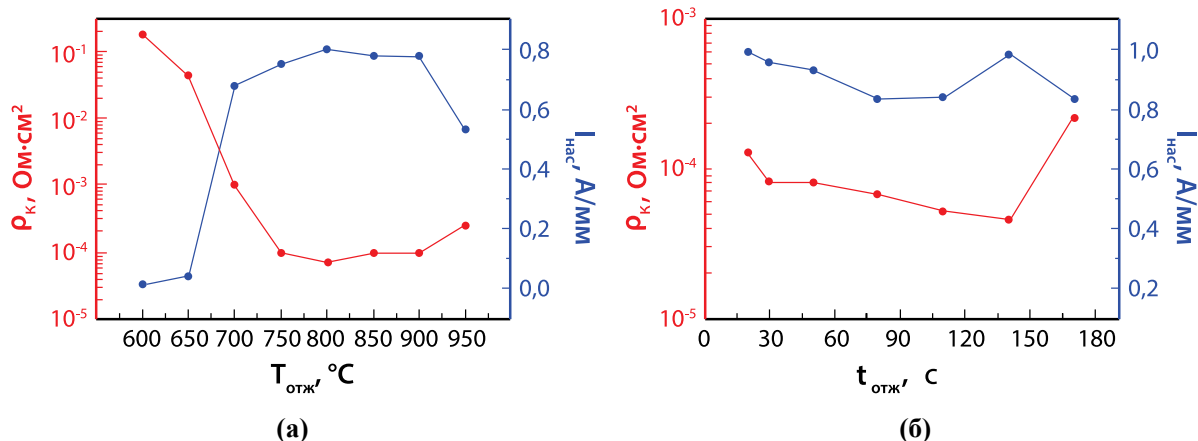


Рис. 2

Зависимость ρ_k и $I_{нас}$ от режима отжига контакта Mo/Al/Mo/Au: а) от $T_{отж}$ (время отжига 30 с); б) от $t_{отж}$ при 800 °C

лизации. Для всех температур длительность отжига была 30 с. Как видно, с ростом температуры от 600 до 750 °C ρ_k уменьшается более чем на три порядка с $3 \cdot 10^{-1}$ до $9,5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², при этом $I_{нас}$ увеличивается от 0,01 А/мм до 0,69 А/мм. Наилучшие электрические параметры контакта наблюдаются при температурах 750-900 °C. В этом диапазоне температур вольт-амперные характеристики контактов демонстрировали омическое поведение, для других температур характеристики были сильно нелинейны. Минимальное значение ρ_k было получено при $T_{отж}$ равной 800 °C и составило $7 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², при этом значение $I_{нас}$ равнялось 0,8 А/мм.

Картина изменения морфологии поверхности омических контактов в зависимости от температуры отжига приведена на рис. 3. Видно, что изготовленные омические контакты имеют развитую поверхность с ровным краем. Наименьшую шероховатость

поверхности имеет контакт, отожжённый при 800 °C. При увеличении температуры выше 900 °C морфология значительно ухудшается, при этом измерение параметров контакта становится затруднительным.

Результаты измерений ρ_k и $I_{нас}$ в зависимости от $t_{отж}$ в диапазоне от 20 до 170 с представлены на рис. 2б. Значение $I_{нас}$ во всём диапазоне измерений в среднем было равно 0,9 А/мм. При увеличении $t_{отж}$ до 140 с наблюдалось постепенное уменьшение значения ρ_k . Однако, при этом происходило заметное ухудшение морфологии поверхности омического контакта и по этой причине $t_{отж}$ было выбрано равным 30 с.

2.2. Выбор толщин слоёв металлизации

При выбранном оптимальном температурно-временном режиме быстрого термического отжига (800 °C, 30 с) было про-

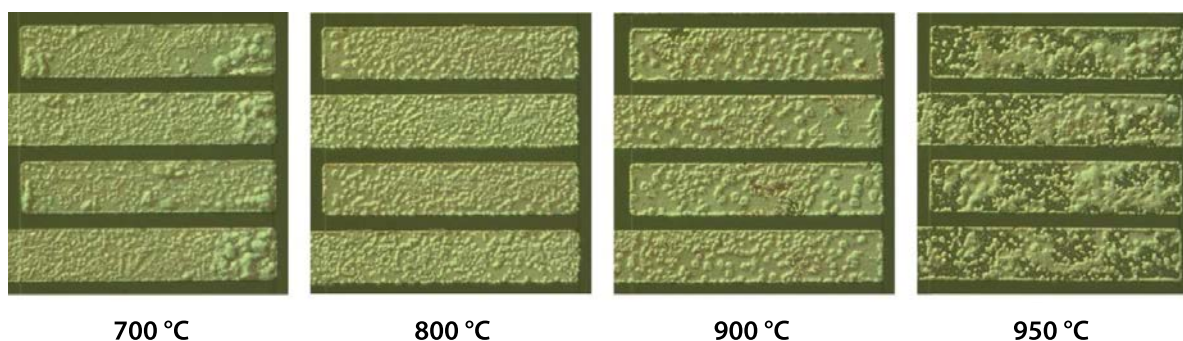


Рис. 3

Фотографии морфологии омических контактов Mo/Al/Mo/Au при различных $T_{отж}$ (время отжига 30 с). Размеры «пальцев» 75×15 мкм

ведено исследование влияния толщин слоёв металлизации на параметры контакта. На первом этапе была получена зависимость ρ_k и $I_{нас}$ от толщины первого слоя Mo $h_{Mo(I)}$, при этом соотношение толщин слоёв Mo/Al сохранялось 1/4 (рис. 4а). Видно, что для толщин от 10 до 20 нм ρ_k практически не меняется, однако уже с увеличением толщины слоя Mo с 20 до 25 нм ρ_k резко возрастает более чем на два порядка с $8,2 \cdot 10^{-5}$ до $9,5 \cdot 10^{-3}$ Ом·см². Поведение $I_{нас}$ примерно соответствует поведению ρ_k . Морфология контакта постепенно ухудшается и для толщин $h_{Mo(I)}$ более 15 нм на поверхности омического контакта начинают появляться пурпурные пятна (рис. 5а).

На втором этапе для оптимальной толщины $h_{Mo(I)}$, равной 10 нм, была получена зависимость параметров контакта от соотношения толщин слоёв Al/Mo $h_{Al}/h_{Mo(I)}$ (рис. 4б). Наименьшее значение ρ_k , равное $3 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², было достигнуто при соотношении $h_{Al}/h_{Mo(I)}$ равном 6. Значение $I_{нас}$ во

всем диапазоне измерений оставалось равным примерно 1 А/мм. Морфология поверхности с увеличением соотношения $h_{Al}/h_{Mo(I)}$, также как и первом случае, ухудшалась с появлением пурпурных пятен. Это согласуется с увеличением толщины Al в обоих случаях (рис. 5б) и позволяет предположить образование интерметаллической фазы Al₂Au.

Результаты подбора оптимальной толщины барьерного слоя Mo $h_{Mo(II)}$ представлены на рис. 4в. Минимальное значение ρ_k было получено при толщине 50 нм и составило $2 \cdot 10^{-5}$ Ом·см². Значение $I_{нас}$ практически не изменялось. Морфология поверхности омического контакта с увеличением $h_{Mo(II)}$ улучшалась (рис. 5в).

Зависимость ρ_k от толщины слоя Au также имеет вид кривой с минимумом для 50 нм. При этом деградация контакта с ростом толщины вероятнее всего связана с диффузией Au вглубь металлизации,

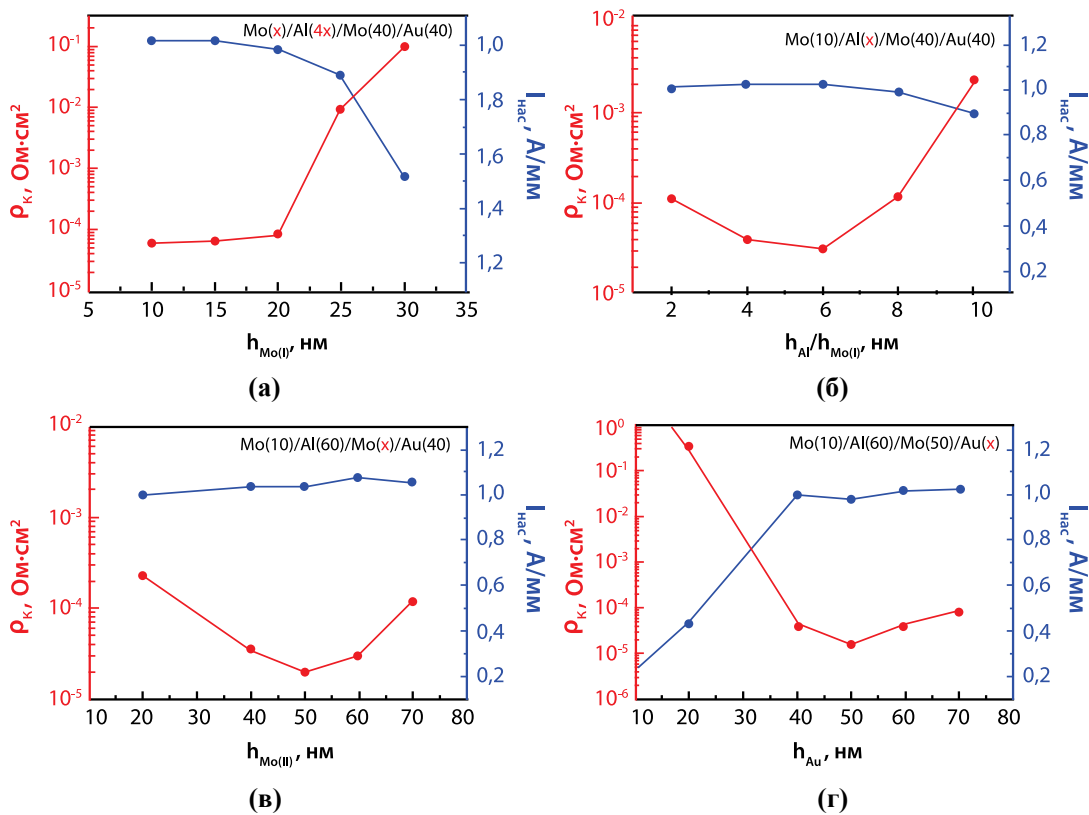


Рис. 4

Зависимость ρ_k и $I_{нас}$ от толщин слоёв: а) от толщины первого слоя Mo, при соотношении толщин слоёв $h_{Al}/h_{Mo(I)} = 1/4$; б) от соотношения толщин слоёв Mo/Al при $h_{Mo(I)} = 10$ нм; в) от толщины барьерного слоя Mo; г) от толщины слоя Au

а резкое ухудшение параметров контакта при малых толщинах золота может указывать на возможное наличие кислорода в камере при быстром термическом отжиге.

Таким образом, были определены оптимальный температурно-временной режим отжига омического контакта (800 °С, 30 с) и оптимальные толщины слоёв системы металлизации Mo(10 нм)/Al(60 нм)/Mo(50 нм)/Au(50 нм). Средние значения ρ_k и R_k для такой системы на ЭГС1 составили соответственно $1,0 \cdot 10^{-5}$ Ом·см² и 0,63 Ом·мм, при этом лучшие значения были $8,0 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² и 0,54 Ом·мм.

Изготовленный к ЭГС2 омический контакт показал значительно более низкие значения ρ_k и R_k – $4,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² и 0,14 Ом·мм, соответственно. Столь резкие различия для используемых ЭГС могут быть обусловлены, прежде всего, разницей в толщинах барьерных слоёв AlGaIn, что может говорить о необходимости подбора толщины данного слоя гетероструктуры для получения оптимальных параметров контакта. Также это может быть связано с различным содержанием Al в тройном соединении и, возможно, различным структурным совершенством подложек, используемых в эксперименте.

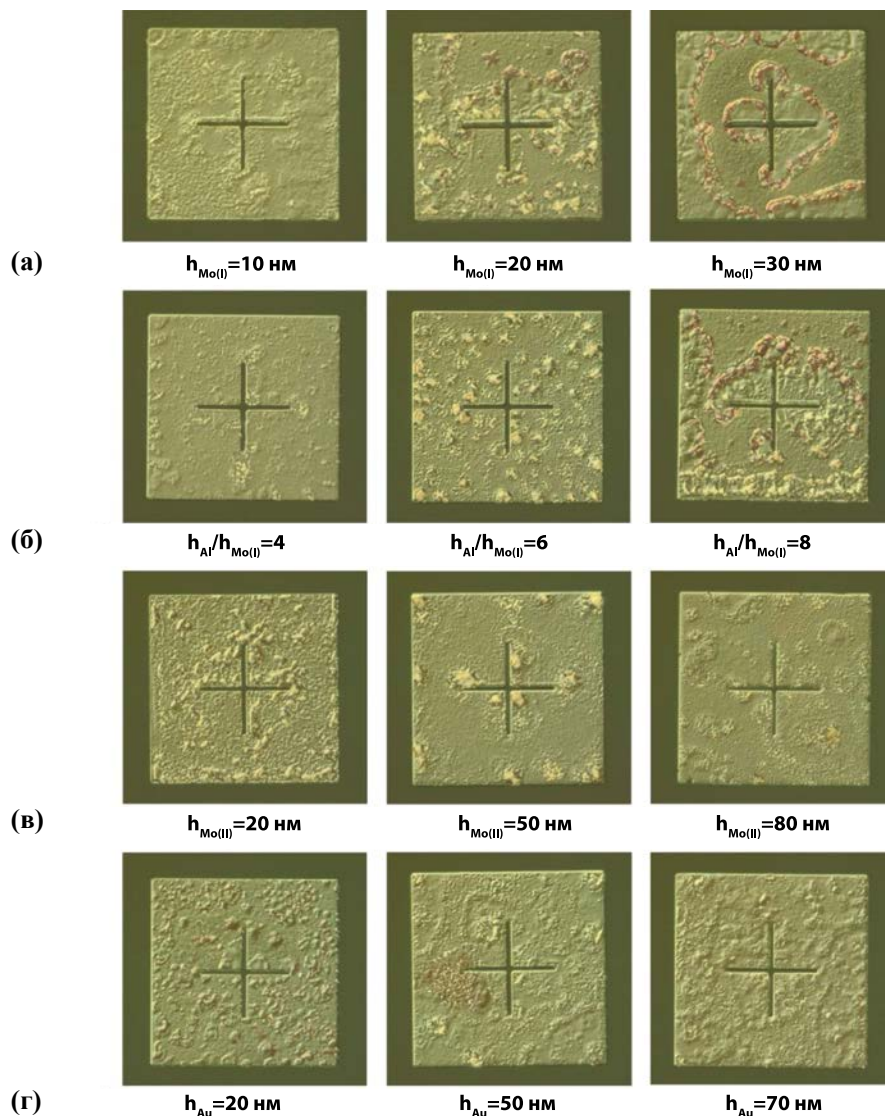
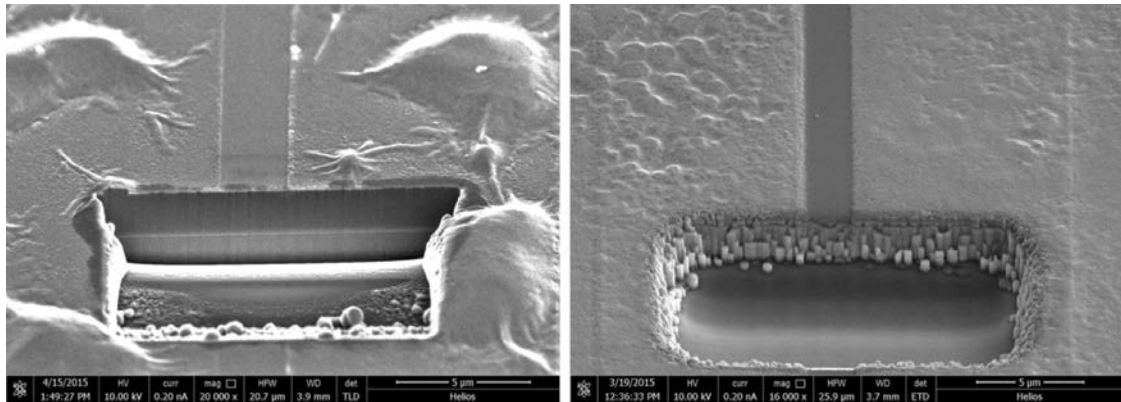


Рис. 5

Фотографии морфологии поверхности контакта Mo/Al/Mo/Au в зависимости от толщин слоёв:
 а) от толщины первого слоя Mo; б) от соотношения толщин слоёв Al/Mo;
 в) от толщины барьерного слоя Mo; г) от толщины слоя Au. Размер знака 60×60 мкм



(а)

(б)

Рис. 6

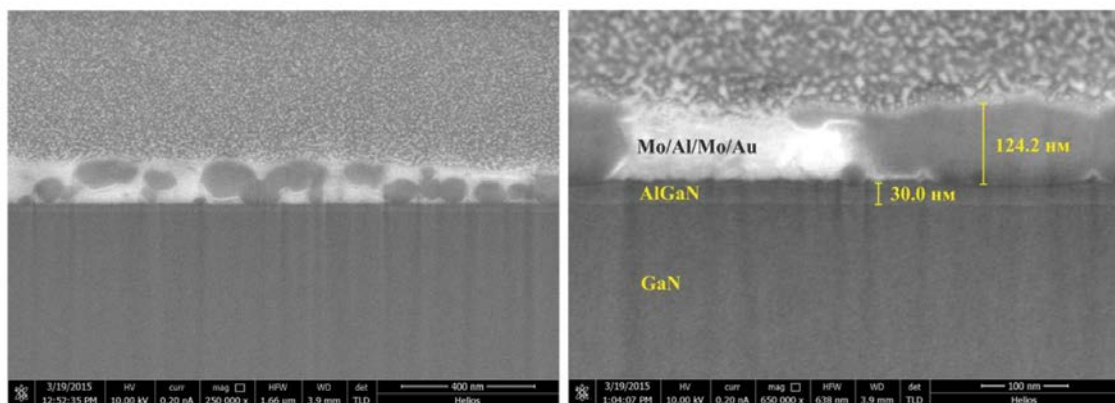
Микроскопические изображения поверхностей омических контактов
Ti/Al/Ni/Au (а) и Mo/Al/Mo/Au (б)

2.3. Микроструктура омического контакта

На рис. 6 представлено сравнение микроскопических изображений поверхности омических контактов на основе стандартной системы Ti/Al/Ni/Au и оптимизированной системы Mo/Al/Mo/Au, отожжённых при температуре 800 °С (углубление на поверхности – подготовка образца с помощью сфокусированного ионного пучка (FIB – focused ion beam) для последующего получения изображений поперечных сечений изготовленных контактов и гетероструктуры). Видно, что края контактных площадок в обоих случаях ровные. На по-

верхности контакта на основе Ti/Al/Ni/Au имеются крупные полусферические выпуклости диаметром примерно 5 мкм в отличие от контакта на основе Mo/Al/Mo/Au, демонстрирующего приемлемую морфологию.

На рис. 7 представлены микроскопические изображения поперечных сечений омического контакта Mo/Al/Mo/Au в двух масштабах. На изображениях хорошо различимы слои гетероструктуры и металлизации. Измеренные толщины слоёв металлизации и слоя AlGaN достаточно хорошо согласуются с данными, полученными при напылении и выращивании слоёв, соответственно. Отметим, что в отличие



(а)

(б)

Рис. 7

Микроскопические изображения поперечных сечений изготовленного омического контакта Mo/Al/Mo/Au к гетероструктуре AlGaN/GaN/Al₂O₃, отожжённого при 800 °С, для различных увеличений: 250000x (а) и 650000x (б)

от стандартной системы Ti/Al/Ni/Au для Mo/Al/Mo/Au заметного вплавления металлов в полупроводник не наблюдается. При этом происходит значительное уменьшение слоевого сопротивления под отожжённым контактом. Проведённые TLM измерения показали значение $65 \text{ Ом}/\square$, что в несколько раз ниже слоевого сопротивления вне контакта $295 \text{ Ом}/\square$.

На рис. 8 представлены рентгеновские дифрактограммы омического контакта Mo/Al/Mo/Au. На дифрактограмме непосредственно после напыления металлизации наблюдаются пики GaN и Al_2O_3 , соответствующие материалу подложки, а также пики Al и Au. После отжига (800°C в течение 30 с) на дифрактограммах были зарегистрированы дополнительные пики, соответствующие фазам Al_2Au , GaMo_3 , $\text{Al}_{3+x}\text{Mo}_{1-x}$ и AlMo_3 . Наличие интерметаллической фазы Al_2Au указывает на взаимодействие между слоями Au и Al, что говорит о диффузии Au вглубь контакта. На присутствие диффузии Mo в полупроводник косвенно может указывать наличие фазы его соединения с Ga. С другой стороны, наличие пиков от GaMo_3 может быть обусловлено диффузией Ga из

полупроводника в металлизацию [21]. Важной особенностью является отсутствие каких-либо пиков, обусловленных соединениями Mo с N, что говорит о различии механизмов формирования контактов на основе систем Mo/Al/Mo/Au и стандартной системы Ti/Al. Для более полного понимания процессов, происходящих при формировании контакта, в дальнейшем будут использованы методы электронной спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии.

2.4. Термостабильность

При испытаниях на термостабильность образец, изготовленный по оптимизированной технологии на ЭГС1, выдерживался в вакууме при температуре 500°C в течение 100 часов, контроль параметров контакта производился каждые 5 часов. На рис. 9 приведены результаты данного испытания. В течение первых 15 часов выдержки наблюдалось некоторое ухудшение электрических параметров контакта: ρ_k увеличилось с $1,2 \cdot 10^{-5}$ до $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, а значение $I_{\text{нас}}$ уменьшилось с 1 до 0,96 А/мм. Дальнейшей деградации параметров практически не происходило.

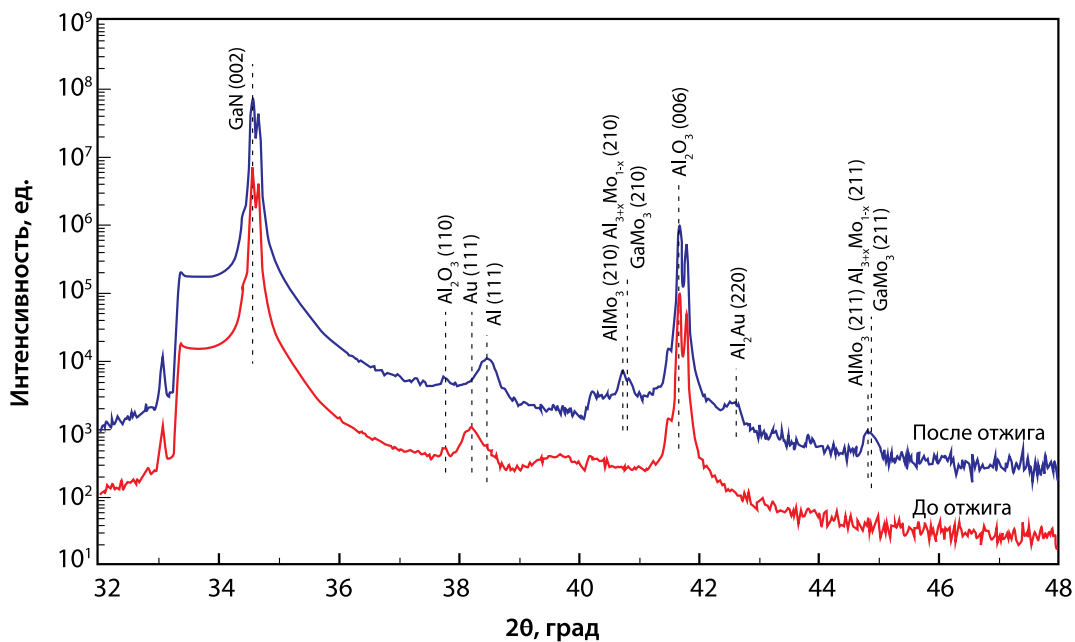


Рис. 8

Дифрактограммы гетероструктур AlGaN/GaN/ Al_2O_3 непосредственно после напыления и отжига омического контакта Mo/Al/Mo/Au

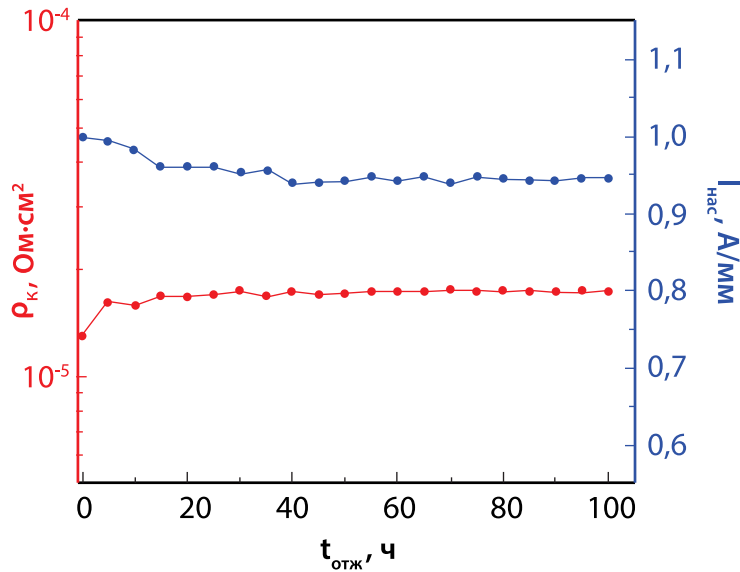


Рис. 9

Зависимость ρ_k и $I_{нас}$ от времени выдержки при температуре 500 °C

Заключение

Исследована система металлизации Mo/Al/Mo/Au с целью создания омических контактов к гетероструктуре AlGaIn/GaN. Определены оптимальные толщины слоёв металлизации Mo(10 нм)/Al(60 нм)/Mo(50 нм)/Au(50 нм) и оптимальный температурно-временной режим отжига (800 °C, 30 с) омического контакта. Значения ρ_k и R_k для ЭГС1 составили, соответственно, $8,0 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² и 0,54 Ом·мм, а для ЭГС2, соответственно, $4,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² и 0,14 Ом·мм.

Методом растровой электронной микроскопии исследована морфология и получены изображения поперечных сечений изготовленных контактов. Исследования, проведённые с помощью рентгеновской дифрактометрии, продемонстрировали наличие интерметаллических фаз Al₂Au, GaMo₃, Al_{3+x}Mo_{1-x} и AlMo₃. Отсутствие фаз соединений Mo с N в совокупности с отсутствием вплавления металлизации в полупроводник позволяет предполагать отличие механизма формирования омического контакта на основе данной системы от такового для стандартной системы Ti/Al.

Продемонстрирована термостабильность омического контакта при температуре 500 °C в течение 100 часов.

Дальнейшие работы будут направлены на оптимизацию режима отжига оми-

ческого контакта, а также на исследование механизма его формирования.

Литература

1. Millan J. et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices // Power Electronics, IEEE Transactions on, 2014, vol. 29, № 5, pp. 2155-2163.
2. Komiak J. J. GaN HEMT: Dominant Force in High-Frequency Solid-State Power Amplifiers // Microwave Magazine, IEEE, 2015, vol. 16, № 3, pp. 97-105.
3. Hwang Y. H. et al. Degradation mechanisms of Ti/Al/Ni/Au-based Ohmic contacts on AlGaIn/GaN HEMTs // Journal of Vacuum Science & Technology B., 2015, vol. 33, № 3, 031212 p.
4. Sasakura A. et al. Cu/Al/Mo/Au and Ni/Al/Mo/Au ohmic contacts for AlGaIn/GaN heterostructures // Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), 2015 IEEE International Meeting for, 2015, pp. 42-43.
5. Yoon S. et al. Microstructural characterization of Au-free Si/Ti/Al/Cu ohmic contacts in an AlGaIn/GaN heterostructure // Thin Solid Films, 2015 (in press).
6. Zheng Z. et al. Nonalloyed ohmic contact of AlGaIn/GaN HEMTs by selective area growth of single-crystal n⁺-GaIn using plasma assisted molecular beam epitaxy // Physica status solidi (a), 2011, vol. 208, № 4, pp. 951-954.
7. Майборода И. О., Андреев А. А., Перминов П. А., Федоров Ю. В., Занавескин М. Л. Селективный рост невжигаемых омических контактов к двумерному электронному газу в транзисторах с высокой подвижностью электронов на основе гетеропере-

- ходов GaN/AlGaN методом молекулярнопучковой эпитаксии // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – №. 11. – С. 80-86.
8. Fujishima T. et al. Formation of low resistance ohmic contacts in GaN-based high electron mobility transistors with BCl_3 surface plasma treatment // *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, № 8, 083508 p.
 9. Cho S. J., Wang C., Kim N. Y. Nano-scale surface morphology optimization of the ohmic contacts and electrical properties of AlGaN/GaN high electron mobility transistors using a rapid thermal annealing dielectric protection layer // *Thin Solid Films*, 2014, vol. 557, pp. 262-267.
 10. Desmaris V. et al. Low-resistance Si/Ti/Al/Ni/Au multilayer ohmic contact to undoped AlGaN/GaN heterostructures // *Electrochemical and solid-state letters*, 2004, vol. 7, № 4, pp. G72-G74.
 11. Ruvimov S. et al. Microstructure of Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts for *n*-GaN // *Applied Physics Letters*, 1996, vol. 69, № 11, pp. 1556-1558.
 12. Wang L., Mohammed F. M., Adesida I. Differences in the reaction kinetics and contact formation mechanisms of annealed Ti/Al/Mo/Au ohmic contacts on *n*-GaN and AlGaN/GaN epilayers // *Journal of applied physics*, 2007, vol. 101, №. 1, pp. 013702.
 13. Motayed A. et al. Electrical, thermal, and microstructural characteristics of Ti/Al/Ti/Au multilayer ohmic contacts to *n*-type GaN // *Journal of applied physics*, 2003, vol. 93, № 2, pp. 1087-1094.
 14. Yafune N. et al. Low-resistivity V/Al/Mo/Au ohmic contacts on AlGaN/GaN annealed at low temperatures // *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 49, № 4S, 04DF10 p.
 15. Malmros A., Blanck H., Rorsman N. Electrical properties, microstructure, and thermal stability of Ta-based ohmic contacts annealed at low temperature for GaN HEMTs // *Semiconductor Science and Technology*, 2011, vol. 26, № 7, 075006 p.
 16. 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.
 17. Basu A. et al. Mo/Al/Mo/Au ohmic contact scheme for $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ high electron mobility transistors annealed at 500 °C // *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 2006, vol. 24, № 2, pp. L16-L18.
 18. Selvanathan D. et al. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures // *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 2004, vol. 22, № 5, pp. 2409-2416.
 19. Lee J. et al. Low resistance Mo/Al/Mo/Au ohmic contact scheme to InAlN/AlN/GaN heterostructure // *Physica status solidi (a)*, 2011, vol. 208, № 7, pp. 1538-1540.
 20. Ando Y. et al. Electron transport mechanism for ohmic contact to GaN/AlGaN/GaN heterostructure field-effect transistors // *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 2013, vol. 60, № 9, pp. 2788-2794.
 21. Chaturvedi N. et al. Mechanism of ohmic contact formation in AlGaN/GaN high electron mobility transistors // *Semiconductor Science and technology*, 2006, vol. 21, № 2, 175 p.

References

1. Millan J. et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices // *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2014, vol. 29, № 5, pp. 2155-2163.
2. Komiak J. J. GaN HEMT: Dominant Force in High-Frequency Solid-State Power Amplifiers // *Microwave Magazine, IEEE*, 2015, vol. 16, № 3, pp. 97-105.
3. Hwang Y. H. et al. Degradation mechanisms of Ti/Al/Ni/Au-based Ohmic contacts on AlGaN/GaN HEMTs // *Journal of Vacuum Science & Technology B.*, 2015, vol. 33, № 3, 031212 p.
4. Sasakura A. et al. Cu/Al/Mo/Au and Ni/Al/Mo/Au ohmic contacts for AlGaN/GaN heterostructures // *Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK)*, 2015 IEEE International Meeting for, 2015, pp. 42-43.
5. Yoon S. et al. Microstructural characterization of Au-free Si/Ti/Al/Cu ohmic contacts in an AlGaN/GaN heterostructure // *Thin Solid Films*, 2015 (in press).
6. Zheng Z. et al. Nonalloyed ohmic contact of AlGaN/GaN HEMTs by selective area growth of single-crystal *n*⁺-GaN using plasma assisted molecular beam epitaxy // *Physica status solidi (a)*, 2011, vol. 208, № 4, pp. 951-954.
7. Mayboroda I. O., Andreev A. A., Perminov P. A., Fedorov Yu. V., Zhanavskiy M. L. Selective MBE growth of nonalloyed ohmic contacts to 2D electron gas in high electron mobility transistors based on GaN/AlGaN heterojunctions. *Pisma v ZHTF* [Technical Physics Letters], 2014, vol. 40, № 11, pp. 80-86.
8. Fujishima T. et al. Formation of low resistance ohmic contacts in GaN-based high electron mobility transistors with BCl_3 surface plasma treatment // *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, № 8, 083508 p.
9. Cho S. J., Wang C., Kim N. Y. Nano-scale surface morphology optimization of the ohmic contacts and electrical properties of AlGaN/GaN high electron mobility transistors using a rapid thermal annealing

- dielectric protection layer // *Thin Solid Films*, 2014, vol. 557, pp. 262-267.
10. Desmaris V. et al. Low-resistance Si/Ti/Al/Ni/Au multilayer ohmic contact to undoped AlGaN/GaN heterostructures // *Electrochemical and solid-state letters*, 2004, vol. 7, № 4, pp. G72-G74.
 11. Ruvimov S. et al. Microstructure of Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts for *n*-GaN // *Applied Physics Letters*, 1996, vol. 69, № 11, pp. 1556-1558.
 12. Wang L., Mohammed F. M., Adesida I. Differences in the reaction kinetics and contact formation mechanisms of annealed Ti/Al/Mo/Au ohmic contacts on *n*-GaN and AlGaN/GaN epilayers // *Journal of applied physics*, 2007, vol. 101, № 1, pp. 013702.
 13. Motayed A. et al. Electrical, thermal, and microstructural characteristics of Ti/Al/Ti/Au multilayer ohmic contacts to *n*-type GaN // *Journal of applied physics*, 2003, vol. 93, № 2, pp. 1087-1094.
 14. Yafune N. et al. Low-resistivity V/Al/Mo/Au ohmic contacts on AlGaN/GaN annealed at low temperatures // *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 49, № 4S, 04DF10 p.
 15. Malmros A., Blanck H., Rorsman N. Electrical properties, microstructure, and thermal stability of Ta-based ohmic contacts annealed at low temperature for GaN HEMTs // *Semiconductor Science and Technology*, 2011, vol. 26, № 7, 075006 p.
 16. 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.
 17. 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, vol. 24, № 2, pp. L16-L18.
 18. Selvanathan D. et al. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures // *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 2004, vol. 22, № 5, pp. 2409-2416.
 19. Lee J. et al. Low resistance Mo/Al/Mo/Au ohmic contact scheme to InAlN/AlN/GaN heterostructure // *Physica status solidi (a)*, 2011, vol. 208, № 7, pp. 1538-1540.
 20. Ando Y. et al. Electron transport mechanism for ohmic contact to GaN/AlGaN/GaN heterostructure field-effect transistors // *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 2013, vol. 60, № 9, pp. 2788-2794.
 21. Chaturvedi N. et al. Mechanism of ohmic contact formation in AlGaN/GaN high electron mobility transistors // *Semiconductor Science and technology*, 2006, vol. 21, № 2, 175 p.