

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛЁНОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТАХ К AlGaN/GaN ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ

© В. А. Буробин, В. В. Пицагин, А. М. Коновалов, М. В. Пашков, А. А. Макаров

АО «Государственный завод «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Транзисторы на основе AlGaN/GaN гетероструктур с высокой подвижностью электронов перспективны для создания высокочастотных, высокотемпературных электронных приборов с повышенной мощностью. Важную роль играет получение омических контактов, имеющих высокую термическую стабильность и гладкую морфологию поверхности. Для формирования омических контактов Ti/Al/металл/Au применялось электронно-лучевое напыление плёнок тугоплавких металлов с ионным ассистированием и предварительная обработка подложек низкоэнергетическими ионами аргона, которая проводилась непосредственно перед напылением без выноса подложек на воздух. Проведено сравнительное исследование микроструктур Ti/Al/Ni/Au и Ti/Al/W/Au контактов.

Ключевые слова: *широкозонные полупроводники, электронный луч, HEMT, электронно-лучевое напыление, омический контакт*

Сведения об авторах: *Буробин Валерий Анатольевич, к.т.н., burobin@gz-pulsar.ru; Пицагин Валерий Валерьевич, к.ф.-м.н., pishagin.pulsar@mail.ru; Коновалов Алексей Михайлович, konovalov.pulsar@mail.ru; Пашков Михаил Викторович, michaelpashkov@yandex.ru; Макаров Андрей Александрович, makarov.pulsar@gmail.com*

Благодарности: *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-00669а*

APPLICATION OF FILMS OF REFRACTORY METALS FOR OHMIC CONTACT ON AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURES

V. A. Burobin, V. V. Pischagin, A. M. Kononov, M. V. Pashkov, A. A. Makarov

JSC «State Plant «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

AlGaN/GaN high electron mobility transistors [HEMTs] are a promising technology for high-frequency, high-temperature, high-power electronic devices. Fabrication of low-resistance ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures is essential to obtain high performance devices. High thermal stability and smooth surface morphology of ohmic contacts are required to increase reliability of transistors. Ti/Al/metal/Au ohmic contacts formation required electron-beam sputtering of refractory metal films with ion assist and substrate pre-processing by the low-energy argon ions performed right before the sputtering without the substrates exposure to the air atmosphere. Comparative study of microstructure of Ti/Al/Ni/Au and Ti/Al/W/Au contacts has been carried out.

Keywords: *wide bandgap semiconductors, Electron Beam Physical Vapor Deposition, HEMT, heterostructures, ohmic contact*

Data of authors: *Burobin Valeriy Anatolievich, Ph.D., burobin@gz-pulsar.ru; Pischagin Valeriy Valerievich, Ph.D., pishagin.pulsar@mail.ru; Kononov Aleksey Mikhaylovich, konovalov.pulsar@mail.ru; Pashkov Mikhail Viktorovich, michaelpashkov@yandex.ru; Makarov Andrey Aleksandrovich, makarov.pulsar@gmail.com*

Acknowledgements: *The reported study was partially supported by RFBR, research project No. № 14-07-00669a*

Введение

Новое поколение полупроводниковых приборов основано на гетероструктурах широкозонных нитридов элементов III группы, в которых образуется двумерный электронный газ с высокой плотностью и подвижностью. В технологии изготовления высококачественных HEMT транзисторов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN важную роль играет получение омических контактов с высокой термостабильностью, с гладкой морфологией поверхности и ровными краями.

В настоящее время для получения омических контактов наиболее широко применяется схема металлизации Ti/Al/Ni/Au. После вакуумного напыления металлических плёнок проводится быстрый термический отжиг в атмосфере азота.

В этой схеме Ti, реагируя с нитридами, образует тонкую плёнку TiN с низкой работой выхода электронов (3,74 эВ), а также – тонкий приповерхностный слой полупроводника, обогащённый донорами (вакансиями азота). Ti и Al образуют термически устойчивые соединения, стабилизирующие свойства контакта. Al также тормозит скорость реакции образования TiN, препятствуя образованию пор. Ni является диффузионным барьерным слоем, который препятствует взаимной диффузии Al и Au и вместе с Au препятствует образованию окисленных плёнок в рабочих слоях.

После быстрого термического отжига все слои перемешиваются и образуют соединения разного химического состава, имеющие форму крупных конгломератов. Получаемая структура и свойства контакта определяются термодинамическими свойствами исходных материалов и кинетикой физико-химических реакций: диффузии, образования зародышей и роста интерметаллических фаз.

Для улучшения свойств омического контакта нужно увеличивать относительную скорость взаимодействия Ti и Al по сравнению со скоростью взаимодействия Al и Au между собой и с материалом диффузионного барьерного слоя. Также нужно уменьшать абсолютные скорости взаимодействия Ti с GaN и материала диффузионного барьерного слоя с Al и Au. С

первой целью применяют тонкие вставки Si в слои Ti и Al [1-3], образующие легкоплавкие эвтектики, вставки Ti в слой Al [4], многоступенчатый режим вжигания [5]. Замедлять реакции могут плёнки тугоплавких металлов, которые имеют коэффициенты самодиффузии и гетеродиффузии на 10-20 порядков ниже, чем Ni и Ti [6].

Исследовалась замена нитридообразующего слоя Ti на Ta, Mo и V [7-10] или применение тонких вставок этих металлов между GaN и Ti, а также замена диффузионного барьерного слоя Ni на Ti, Pd, Mo, Be, Ir, Nb, V, Ta [11]. После отжига барьерные слои разрушались и перемешивались с другими металлами контакта. Исключения составляют плёнки тугоплавких металлов: Ta и Mo сохраняют своё местоположение, но пропускают сквозь себя Al и Au. Вольфрам, самый тугоплавкий металл, полностью устраняет перемешивание Al и Au даже при 950 °C [14]. Последняя работа опубликована в 2007 году и дальнейшего развития не получила. Это, по-видимому, связано с высокими внутренними механическими напряжениями, возникающими при росте вольфрамовых плёнок. При достижении критической толщины, когда внутренняя механическая энергия плёнки сравнивается с энергией адгезии, плёнка отрывается от подложки.

Эксперименты

В работе проведено сравнительное исследование структур омических контактов Ti/Al/Ni/Au и Ti/Al/W/Au на AlGaIn/GaN гетероструктурах.

Для экспериментов использовались гетероэпитаксиальные структуры, выращенные МOC-гидридным методом на сапфировой подложке (ЗАО «Элма-Малахит» г. Зеленоград). Характеристики структур и технологические операции получения омических контактов представлены в работе [15]. Омический контакт формировался на «меза» структурах контактной литографией с использованием двухслойной системы фоторезистов (технология lift-off) и напылением металлических композиций Ti/Al/Ni(W)/Au. Перед напылением

пластина обрабатывалась в кислородной плазме и разбавленной соляной кислоте. Обработка в кислородной ВЧ-плазме проводилась в установке «Плазма 600» при частоте 13,56 МГц в потоке кислорода при давлении $8 \cdot 10^{-1}$ торр. в течение 60 с.

Напыление слоёв проводилось на вакуумной установке PVD-250 (Kurt J.Lesker) с безмасляной откачкой спиральным механическим и криогенным гелиевым насосами с давлением остаточных газов $10^{-7} - 10^{-8}$ торр., электронно-лучевым испарителем KL-6 и широкоугольным низкоэнергетическим ионным источником холловского типа EH-400 фирмы «Кауфман и Робинсон» с регулируемой максимальной энергией ионов аргона от 50 до 240 эВ и ионным током от 0 до 0,75 А.

Конструкция установки и режимы напыления ряда металлических плёнок с ионным ассистированием представлены в работе [16].

Загрязнения поверхности материалов значительно ухудшают адгезию напылённых плёнок и могут изменять характеристики электронных приборов. Кроме возможных загрязнений от предыдущих технологических операций полупроводниковые пластины содержат загрязнения, попадающие из окружающей среды при загрузке в установку и в вакуумной камере. Это – адсорбированная влага, гидроксильные группы OH, газовые примеси и углеводородные соединения. Эффективным средством очистки поверхности от этих загрязнений является обработка низкоэнергетическими ионами (25-100 эВ) аргона, азота или кислорода [17], которая проводится в вакуумной камере непосредственно перед напылением без выноса пластин на воздух. Считается, что для очистки поверхности, достаточна доза ионов $6 \cdot 10^{15} - 6 \cdot 10^{16}$ ион/см². В работе применялась доза очистки $1,5 \cdot 10^{17}$ ион/см². Это обеспечивало очистку поверхности от загрязнений и удалению нескольких атомных слоёв подложки. При таком удалении разрываются химические связи между атомами и на поверхности подложки остаются свободные химические связи, подобно тому, как образуются радикалы при разрыве молекул. Такая

«активированная» поверхность обеспечивает прочное сцепление с напыляемыми на неё плёнками. Применение ионной очистки подложек позволило устранить проблемы адгезии плёнок титана, вольфрама и других металлов при их напылении на Si, AlN, GaN, SiC, алмаз и другие подложки.

В то же время, полупроводники проявляют высокую чувствительность к обработке ионами. Отмечалось [17], что обработка GaAs ионами аргона с энергией 50 эВ приводила к изменению диодных характеристик. Химическое травление слоя толщиной 17 Å, обработанного ионами GaAs, восстанавливало диодные характеристики.

Взаимодействуя с веществом, ионы производят дефекты типа пар Френкеля: вакансии и атом в междоузлиях приводят к образованию молекулярно-динамических кластеров с повышенной амплитудой колебаний атомов (локальный нагрев) и распылению материала [18-19]. Распыление нитридов BN, AlN, GaN в широком диапазоне энергий для разных видов ионов теоретически и экспериментально исследовалось в работах [20-21]. Отмечалось, что N и Ga распыляются из соединения с разными коэффициентами распыления. Более лёгкий азот распыляется сильнее, образуя в приповерхностном слое вакансии азота.

В работе [22] проверялась дефектность поверхности пластин GaN после ионной обработки методом Резерфодовского обратного рассеивания (POP). Также проводились сравнительные исследования электрических параметров омических контактов и барьеров Шоттки на тестовых структурах на основе GaN. Было показано, что обработка GaN ионами аргона со средней энергией 75 эВ с указанной выше дозой, приводит к образованию у поверхности донорного слоя и на порядок уменьшает удельное контактное сопротивление.

Все металлы напылялись в одном технологическом процессе из четырёх тиглей. Толщина слоёв в системе Ti/Al/Ni/Au составляла 20/150/50/100 нм. В системе с Ti/Al/W/Au изменялась толщина только третьего слоя W, которая составляла 20 нм.

Результаты

На рис. 1 представлено оптическое изображение поверхности системы Ti/Al/Ni/Au после вжигания, полученное на измерительном лазерном микроскопе OLS 4000. Высота конгломератов примерно 0,417 мкм.

На рис. 2 представлено электронно-микроскопическое изображение этой поверхности. На обоих изображениях видно, что поверхность состоит из трёх фаз: крупные конгломераты в форме капель и относительно гладкие участки. На рис. 3-5 представлены результаты измерения химического состава областей, отмеченные на рис. 2 и полученные методом рентгеновского дисперсионного анализа. Капли состоят из соединений Al-Ni и Al-Au, в гладких участках преобладает золото.

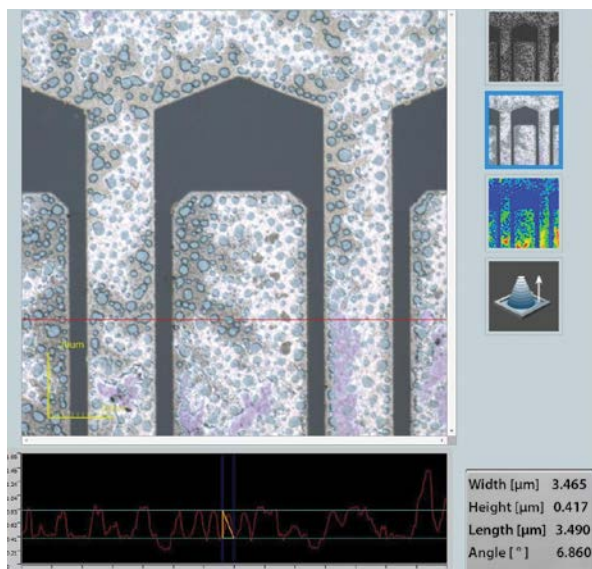


Рис. 1

Оптическое изображение поверхности системы Ti/Al/Ni/Au после вжигания

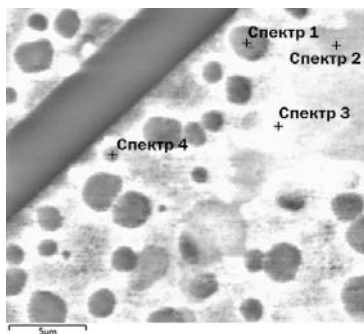


Рис. 2

Электронно-микроскопическое изображение поверхности системы Ti/Al/Ni/Au после вжигания

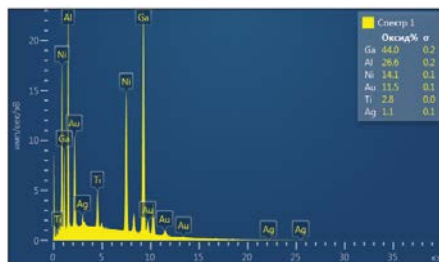


Рис. 3

Химический состав фаз по поверхности системы Ti/Al/Ni/Au спектр 1

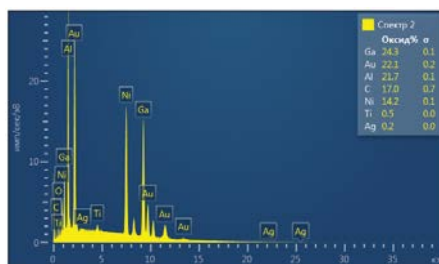


Рис. 4

Химический состав фаз по поверхности системы Ti/Al/Ni/Au спектр 2

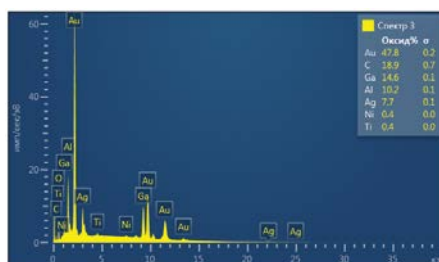


Рис. 5

Химический состав фаз по поверхности системы Ti/Al/Ni/Au спектр 3

новского дисперсионного анализа. Капли состоят из соединений Al-Ni и Al-Au, в гладких участках преобладает золото.

В новой системе существенно изменилась морфология поверхности. На рис. 6 представлено оптическое изображение поверхности системы Ti/Al/W/Au: характер поверхности изменился – избыточный Al пробивается по микротрещинам в плёнке вольфрама и «стягивает» на себя часть золотого покрытия. Максимальная высота неровностей составляла 0,143 мкм. На рис. 7 и рис. 8 показано электронно-микроскопическое изображение и распределение элементов по поверхности структуры. После вжигания при 950 °С вольфрам остался неизменным.

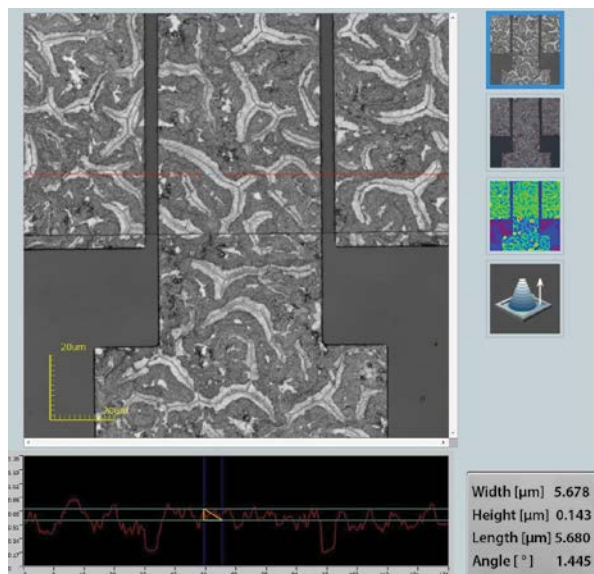


Рис.6

Оптическое изображение поверхности системы Ti/Al/W/Au после вжигания

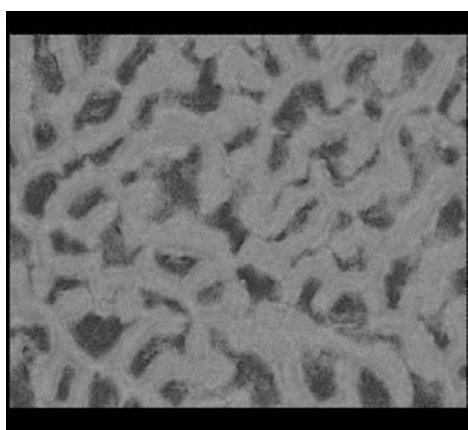


Рис.7

Электронно-микроскопическое изображение поверхности системы Ti/Al/W/Au после вжигания

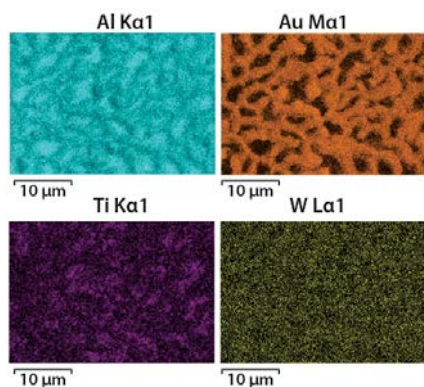


Рис.8

Распределение элементов по поверхности системы Ti/Al/W/Au

Обе системы имели удельное сопротивление омических контактов в пределах $8 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-5}$ Ом·см². Разброс удельного сопротивления определяется качеством гетероэпитаксиальных структур. Дальнейшее улучшение удельного сопротивления омического контакта возможно при оптимизации толщин слоёв напыляемых металлов и температурного профиля вжигания. Высота неровностей на поверхности уменьшилась в 3 раза, а также улучшился край металлизации омического контакта. В дальнейшем предполагается улучшить качество вольфрамовой плёнки за счёт устранения механических напряжений и микротрещин. В исследованиях [23-24] показано (на примере плёнок никеля), что изменение параметров ионного пучка приводит к изменению механического напряжения, напыляемой металлической плёнки (от сильного растяжения до сильного сжатия), а также её плотности и ориентации кристаллитов.

Заключение

Показана технологическая возможность применения в структурах омических контактов, наряду с плёнками тугоплавких металлов молибдена и тантала, плёнок самого тугоплавкого металла-вольфрама.

Обработка поверхности нитрида галлия низкоэнергетическими ионами аргона улучшает адгезию напыляемых плёнок и создаёт в приповерхностном слое нитрида вакансии азота, образующие донорный слой, который уменьшает контактное сопротивление.

Литература

1. Mohammed F. M., Wang L., Koo H. J. and Adesida I. Si-induced enhancement of ohmic performance of Ti/Al/Mo/Au metallisation for AlGaIn/GaN HEMTs // Electronics letters, 18th August 2005, vol. 41, no. 17, 984 p.
2. Mohammed F. M., Wang L. and Adesida I. Ultralow resistance Si-containing Ti/Al/Mo/Au Ohmic contacts with large processing window for AlGaIn/GaN heterostructures // Appl. Phys. Lett. 88, 2006, pp. 212107 (1-3).
3. Mohammed F. M., Wang L. and Adesida I. First-layer Si metallizations for thermally stable and smooth Ohmic contacts for AlGaIn/GaN high electron mobility

- transistors // *J. Vac. Sci. Technol. B* 25,2, Mar/Apr 2007, pp. 324-334.
4. Lee Y. S., Choi H. G., Hahn C.-K., Kim S. J., Kim T. G. Improved Dc Characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs with Ti/Al/Ti/Ni/Au Electrode Schemes // *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 56, no. 4, April 2010, pp. 1287-1290.
 5. Feng Q., Li L., Hao Y., Bi Z. The improvement of ohmic contact of Ti/Al/Ni/Au to AlGaIn/GaN HEMT by multi-step annealing method // *Proc. of SPIE*, vol. 7518, 2009, pp. 751814 (1-9).
 6. Лариков Л. Н., Исайчев В. И. Структура и свойства металлов и сплавов. Диффузия в металлах и сплавах: справочник. – Киев: Наукова думка, 1987.
 7. Qiao D., Jia L., Yu L. S., Asbeck P. M., Lau S. S., Lim S.-H., Liliental-Weber Z., Haynes T. E., Barner J. B. Ta-based interface ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures // *J. Appl. Phys.*, vol. 89, no. 10, 15 May 2001, pp. 5543-5546.
 8. 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 // *J. Vac. Sci. Technol. B* 22 (5), 2004, pp. 2409-2416.
 9. Basu A., Mohammed F. M., Guo S., Peres B., Adesida I. Mo/Al/Mo/Au Ohmic contact scheme for AlGaIn/GaN high electron mobility transistors annealed at 500 °C // *J. Vac. Sci. Technol. B* 24 (2), Mar/Apr 2006.
 10. Кондаков М. Н., Гладышева Н. Б., Дорофеев А. А., Черных С. В., Черных А. В., Диденко С. И. Исследование системы металлизации Mo/Al/Mo/Au для омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN // *Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА»*, г. Дубна, 8-10 октября 2014, с. 303-304.
 11. Mohammed F. M., Wang L., Koo H. J., Adesida I. Anatomy-performance in Ti-based contact metallization on AlGaIn/GaN heterostructures // *Journal of Applied Physics*, 101, 2007, 033708.
 12. Wang C., Kim N. Electrical characterization and nanoscale surface characterization and surface morphology of optimized Ti/Al/Ta/Au ohmic contact for AlGaIn/GaN HEMT // *Nanoscale Research Letters*, 2012, 7, 107 p.
 13. Wang C., Cho S., Kim N. Optimization of ohmic contacts metallization process for AlGaIn/GaN high electron mobility transistor // *Transaction on electrical and electronic material*, vol. 14, no. 1, 2013, 32 p.
 14. Lee H. C., Bae J. W., Yeom G. Y. Thermally stable Ti/Al/W/Au multilayer ohmic contacts on n-Type GaN // *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 51, no. 3, September 2007, pp. 1046-1049.
 15. Коновалов А. М., Пицагин В. В., Пашков М. В., Макаров А. А. Исследование температурной обработки металлической композиции Ti/Al/Ni/Au на формирование омического контакта к гетероструктуре AlGaIn/GaN // *Материалы XII научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА»*, г. Москва, 24-25 октября 2013, с. 301-304.
 16. Пицагин В. В., Пашков М. В. Электронно-лучевое испарение и ионное ассистирование в технологии ИЭТ // *Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА»*, г. Москва, 24-25 октября 2013, с. 317-320.
 17. Kaufman H. R., Harper J. M. E. Ion-assist application of broad-beam ion sources // *Proceedings of SPIE*, 5527, Aug. 2004, pp. 50-68.
 18. Плешивцев Н. В. Катодное распыление. – М.: Атомиздат, 1968. – 347 с.
 19. Nastasi M., Mayer J. W., Hirvonen J. K. // *Ion-Solid Interactions: Fundamentals & Applications* Cambridge University Press, 1996.
 20. Еловиков С. С., Зыкова Е. Ю., Мосунов А. С., Юрасова В. Е., Рыжов Ю. А., Шкарбан И. И. Энергия и массовая зависимость распыления нитридов и их компонентов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез»*. – 2007. – Вып. 2. – С. 26-35.
 21. Рыжов Ю. А., Семенов А. А., Шкарбан И. И., Мосунов А. С., Юрасова В. Е., Особенности распыления ионами низких энергий бинарных соединений и композиционных мишеней // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез»*. – 2004. – Вып. 2. – С. 54-65.
 22. Пицагин В. В., Сейдман Л. А., Коновалов А. М., Корнеев В. И., Енишерлова К. Л., Куликаускис В. С. Эффект плазмохимической обработки при изготовлении приборов на основе AlGaIn/GaN // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2015. – № 7. – С. 34-44.
 23. Пицагин В. В., Пашков М. В., Коновалов А. М., Енишерлова К. Л., Лютцау А. В., Миллер С. В. Модификация свойств тонких плёнок никеля ионной обработкой // *Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА»*, г. Дубна, 8-10 октября 2014, с. 245-249.
 24. Пицагин В. В., Пашков М. В., Коновалов А. М., Енишерлова К. Л., Лютцау А. В., Миллер С. В., Куликаускис В. С.

скис В. С. Исследование влияния ионной обработки в процессе электронно-лучевого напыления наноразмерных слоёв металлов на гетероструктуры AlGaIn/GaN // *Материалы X международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология»*, г. Москва, 2015, с. 128-136.

References

1. Mohammed F. M., Wang L., Koo H. J. and Adesida I. Si-induced enhancement of ohmic performance of Ti/Al/Mo/Au metallisation for AlGaIn/GaN HEMTs // *Electronics letters*, 18th August 2005, vol. 41, no. 17, 984 p.
2. Mohammed F. M., Wang L. and Adesida I. Ultralow resistance Si-containing Ti/Al/Mo/Au Ohmic contacts with large processing window for AlGaIn/GaN heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* 88, 2006, pp. 212107 (1-3).
3. Mohammed F. M., Wang L. and Adesida I. First-layer Si metallizations for thermally stable and smooth Ohmic contacts for AlGaIn/GaN high electron mobility transistors // *J. Vac. Sci. Technol. B* 25,2, Mar/Apr 2007, pp. 324- 334.
4. Lee Y. S., Choi H. G., Hahn C.-K., Kim S. J., Kim T. G. Improved Dc Characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs with Ti/Al/Ti/Ni/Au Electrode Schemes // *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 56, no. 4, April 2010, pp. 1287-1290.
5. Feng Q., Li L., Hao Y., Bi Z. The improvement of ohmic contact of Ti/Al/Ni/Au to AlGaIn/GaN HEMT by multi-step annealing method // *Proc. of SPIE*, vol. 7518, 2009, pp. 751814 (1-9).
6. Larikov L. N., Isaytsev V. I. *Struktura i svoystva metallov i splavov. Diffuziya v metallakh i splavakh: spravochnik* [Structure and characteristics of metals and alloys. Diffusion in metals and alloys: catalogue]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987.
7. Qiao D., Jia L., Yu L. S., Asbeck P. M., Lau S. S., Lim S.-H., Liliental-Weber Z., Haynes T. E., Barner J. B. Ta-based interface ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures // *J. Appl. Phys.*, vol. 89, no. 10, 15 May 2001, pp. 5543- 5546.
8. 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 // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 22 (5), 2004, pp. 2409-2416.
9. Basu A., Mohammed F. M., Guo S., Peres B., Adesida I. Mo/Al/Mo/Au Ohmic contact scheme for AlGaIn/GaN high electron mobility transistors annealed at 500 °C // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 24(2), Mar/Apr 2006.
10. Kondakov M. N., Gladysheva N. B., Dorofeev A. A., Chernykh S. V., Chernykh A. V., Didenko S. I. *Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XIII Russian scientific conference «Solid-state electronics. Complex functional REB»]. Dubna, 8-10th of October 2014, pp. 303-304.
11. Mohammed F. M., Wang L., Koo H. J., Adesida I. Anatomy-performance in Ti-based contact metallization on AlGaIn/GaN heterostructures // *Journal of Applied Physics*, 101, 2007, 033708.
12. Wang C., Kim N. Electrical characterization and nanoscale surface characterization and surface morphology of optimized Ti/Al/Ta/Au ohmic contact for AlGaIn/GaN HEMT // *Nanoscale Research Letters*, 2012, 7, 107 p.
13. Wang C., Cho S., Kim N. Optimization of ohmic contacts metallization process for AlGaIn/GaN high electron mobility transistor // *Transaction on electrical and electronic material*, vol. 14, no. 1, 2013, 32 p.
14. Lee H. C., Bae J. W., Yeom G. Y. Thermally stable Ti/Al/W/Au multilayer ohmic contacts on n-Type GaN // *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 51, no. 3, September 2007, pp. 1046-1049.
15. Konovalov A. M., Pischagin V. V., Pashkov M. V., Makarov A. A. *Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XII Russian scientific conference «Solid-state electronics. Complex functional REB»]. Moscow, 24-25th of October 2013, pp. 301-304.
16. Pischagin V. V., Pashkov M. V. *Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XII Russian scientific conference «Solid-state electronics. Complex functional REB»]. Moscow, 24-25th of October 2013, pp. 317-320.
17. Kaufman H. R., Harper J. M. E. Ion-assist application of broad-beam ion sources // *Proceedings of SPIE*, 5527, Aug. 2004, pp. 50-68.
18. Pleshivtsev N. V. *Katodnoe raspylenie* [Cathode sputtering]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968, 347 p.
19. Nastasi M., Mayer J. W., Hirvonen J. K. // *Ion-Solid Interactions: Fundamentals & Applications* Cambridge University Press, 1996.
20. Elovikov S. S., Zykova E. Yu., Mosunov A. S., Yurasova V. E., Ryzhov Yu. A., Shkarban I. I. Energy and mass relationship of nitride and its components sputtering. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. «Termoyaderny*

- sintez*» [Issues of atom science and engineering. Ser. «Nuclear Fusion»], 2007, № 2, pp. 26-35.
21. Ryzhov Yu. A., Semenov A. A., Shkarban I. I., Mosunov A. S., Yurasova V. E. Features of ion sputtering of low-energy binary structures and compositional targets. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. «Termoyaderny sintez»* [Issues of atom science and engineering. Ser. «Nuclear Fusion»], 2004, № 2, pp. 54-65.
22. Pischagin V. V., Seidman L. A., Konovalov A. M., Korneev V. I., Enisherlova K. L., Kulikauskis V. S. Effect of chemical plasma processing for AlGaIn/GaN devices fabrication. *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya* [Surface. X-Ray, synchrotron and neutron researches], 2015, № 7, pp. 34-44.
23. Pischagin V. V., Pashkov M. V., Konovalov A. M., Enisherlova K. L., Lutsau A. V., Miller S. V. *Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XIII Russian scientific conference «Solid-state electronics. Complex functional REB»]. Dubna, 8-10th of October 2014, pp. 245-249.
24. Pischagin V. V., Seidman L. A., Konovalov A. M., Korneev V. I., Enisherlova K. L., Lutsau A. V., Miller S. V., Kulikauskis V. S. *Materialy X mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya»* [Proceedings of X international scientific and technological conference «Vacuum engineering, materials and technology»]. Moscow, 2015, pp. 128-136.