



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-13-19>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.382.323

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОМИЧЕСКОГО КОНТАКТА МЕТАЛЛИЗАЦИИ Ti/Al/Ni К ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ GaN/AlGaN

А.Д. ЮНИК, Я.А. СОЛОВЬЕВ, Д.В. ЖИГУЛИН

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27 декабря 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

**Аннотация.** Измерениями по методу длинной линии и вторичной ионной масс-спектрографии установлено влияние температуры быстрого термического отжига на электрофизические свойства омического контакта металлизации Ti/Al/Ni с толщинами слоев 20/120/40 нм к гетероструктуре GaN/AlGaN с двумерным электронным газом на сапфировой подложке. Быстрый термический отжиг образцов проводили в среде азота при температуре в диапазоне от 850 до 900 °С в течение 60 с. Установлено, что на исходных образцах между металлизацией и двумерным электронным газом располагается высокоомный слой гетероструктуры толщиной порядка 25 нм, препятствующий формированию омического контакта. После быстрого термического отжига при температуре менее 862,5 °С происходит взаимодействие компонентов металлизации друг с другом и гетероструктурой, приводящее к уменьшению толщины высокоомного слоя гетероструктуры до 15–20 нм и нелинейности вольт-амперных характеристик. При температуре быстрого термического отжига от 862,5 до 875 °С толщина высокоомного слоя гетероструктуры уменьшается до нескольких единиц нанометров за счет взаимодействия компонентов металлизации Ti/Al/Ni с гетероструктурой, что способствует туннелированию носителей заряда и формированию качественного омического контакта с удельным сопротивлением порядка  $1 \cdot 10^{-4}$  Ом·см<sup>2</sup>. При увеличении температуры быстрого термического отжига более 875 °С взаимодействие компонентов металлизации и гетероструктуры происходит по всей глубине, двумерный электронный газ деградирует, а вольт-амперная характеристика контакта становится нелинейной. Полученные результаты могут быть использованы в технологии создания изделий на основе GaN с двумерным электронным газом.

**Ключевые слова:** нитрид галлия, гетероструктура, двумерный электронный газ, омический контакт, быстрый термический отжиг.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Юник А.Д., Соловьев Я.А., Жигулин Д.В. Влияние температуры быстрого термического отжига на электрофизические свойства омического контакта металлизации Ti/Al/Ni к гетероструктуре GaN/AlGaN. Доклады БГУИР. 2022; 20(3): 13-19.

## EFFECT OF RAPID THERMAL ANNEALING TEMPERATURE ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF THE OHMIC CONTACT OF Ti/Al/Ni METALLIZATION TO THE GaN/AlGaN HETEROSTRUCTURE

ANDREI D. YUNIK, JAROSLAV A. SOLOVJOV, DZMITRY V. ZHYHULIN

*JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 27 December 2021*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Abstract.** Effect of rapid thermal annealing temperature on the electrophysical properties of the ohmic contact of Ti/Al/Ni metallization with layer thicknesses of 20/120/40 nm to the GaN/AlGaN heterostructure with a two-dimensional electron gas on a sapphire substrate has been discovered by transmission line measurement and secondary ion mass spectroscopy methods. Rapid thermal annealing of the samples was carried out in a nitrogen atmosphere at the temperature ranging from 850 to 900 °C for 60 s. It has been discovered that a high-resistance heterostructure layer with a thickness of about 25 nm is located on the initial samples between metallization and the two-dimensional electron gas, which prevents the formation of ohmic contact. After rapid thermal annealing at the temperature of less than 862,5 °C, the metallization components interact with each other and with the heterostructure, which leads to the decrease in the thickness of the high-resistance heterostructure layer to 15–20 nm and to the nonlinearity of the I – V characteristic. At rapid thermal annealing temperatures in the range from 862,5 to 875 °C, the thickness of the high-resistance heterostructure layer decreases to several nanometers due to the interaction of Ti/Al/Ni metallization components with the heterostructure, which promotes the tunneling effect of charge carriers and formation of a high-quality ohmic contact with a resistivity of about  $1 \cdot 10^{-4}$  Ohm·cm<sup>2</sup>. With an increase of the rapid thermal annealing temperature over 875 °C, the interaction of the metallization and heterostructure components occurs throughout the entire depth, the two-dimensional electron gas degrades, and the I – V characteristic of the contact becomes nonlinear. The results obtained can be used in the technology for creating GaN-based products with a two-dimensional electron gas.

**Keywords:** gallium nitride, heterostructure, two-dimensional electron gas, ohmic contact, rapid thermal annealing.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Yunik A.D., Solovjov Ja.A., Zhyhulin D.V. Effect of Rapid Thermal Annealing Temperature on the Electrophysical Properties of the Ohmic Contact of Ti/Al/Ni Metallization to the GaN/AlGaN Heterostructure. Doklady BGUIR. 2022; 20(3): 13-19.

### Введение

Одним из важнейших вопросов в технологии создания устройств на гетероструктурах (ГС) GaN/AlGaN с двумерным электронным газом (ДЭГ) является формирование омических контактов с низким уровнем удельного контактного сопротивления (порядка  $10^{-4}$  Ом·см<sup>2</sup> и менее). Принцип получения таких контактов основан на формировании на границе раздела металл–полупроводник сильнолегированной области с образованием в полупроводнике очень тонкого энергетического барьера, позволяющего носителям заряда туннелировать через него [1].

На текущий момент наиболее распространенной технологией для получения омических контактов к ГС GaN/AlGaN с ДЭГ является применение многокомпонентных металлizations на основе структур Ti/Al с использованием Au, типа Ti/Al/X/Au, где в качестве X могут выступать слои Ni, Mo, Pt, Ti, Ta, Nb, Ir и др. [2]. Как правило, металлizations такого типа подвергаются быстрому термическому отжигу (БТО) при температурах от 800 до 900 °C на протяжении 30–60 с в атмосфере азота.

Большой интерес также представляет формирование омического контакта без использования золота (так называемая Au-free технология). Это связано с необходимостью

снижения производственных затрат на изготовление устройств на основе GaN, а также с перспективой интеграции GaN-технологии в уже хорошо изученные КМОП-устройства, в которых использование золота является нежелательным [2].

Для формирования Au-free омических контактов к ГС GaN/AlGaN с ДЭГ существует несколько различных подходов, таких как ионная имплантация AlGaN кремнием в области контакта [3], селективный гетероэпитаксиальный рост слоя  $n^+$ -GaN в области контакта [4], локальное травление слоя AlGaN в области контакта [5], использование многослойных металлизаций типа Ta/Si/Ti/Al/Ni/Ta [6] или использование других типов металлизаций на основе металлов с низкой работой выхода, таких как Ta или Ti [7]. Однако данные подходы значительно усложняют процесс формирования омического контакта к ГС GaN/AlGaN. Таким образом, формирование омического контакта к ГС GaN/AlGaN с ДЭГ с использованием Au-free металлизации на основе Ti/Al является актуальной задачей.

Настоящая работа посвящена установлению влияния температуры БТО на электрофизические свойства омического контакта Au-free металлизации Ti/Al/Ni к ГС GaN/AlGaN с ДЭГ.

### Методика проведения эксперимента

В работе использовали ГС GaN/AlGaN с ДЭГ на подложке сапфира диаметром 100 мм с суммарной толщиной слоев порядка 3100 нм (рис. 1) со следующими параметрами двумерного электронного газа: величина подвижности основных носителей заряда составила  $2100 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  при концентрации электронов  $1,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , слои сопротивление составило порядка  $320 \text{ Ом}/\square$ .

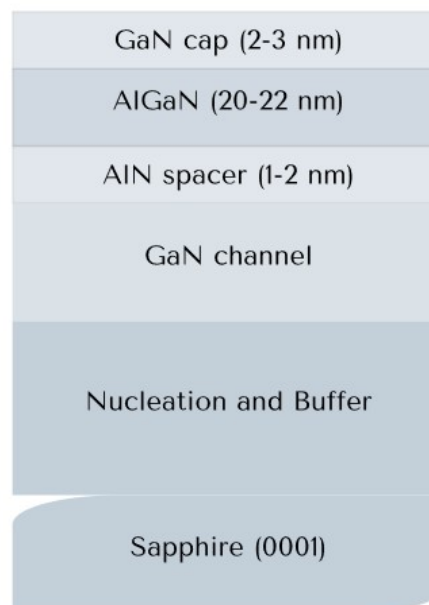


Рис. 1. Дизайн гетероструктуры  
Fig. 1. Heterostructure design

Электрофизические свойства контактов определяли путем измерения сопротивления между контактными площадками на тестовых элементах, сформированных согласно методу длинной линии (МДЛ) [8] с расстоянием между контактными площадками  $L_5 = 32 \text{ мкм}$ ,  $L_4 = 16 \text{ мкм}$ ,  $L_3 = 8 \text{ мкм}$ ,  $L_2 = 4 \text{ мкм}$ ,  $L_1 = 2 \text{ мкм}$ .

Изоляцию элементов в ГС осуществляли меза-канавками. Травление выполняли на установке плазмохимического травления в хлорсодержащих средах ICP200ES (ЗАО «НТО», Россия). Омические контакты формировали методом взрывной (lift-off) фотолитографии.

Непосредственно перед нанесением металлизации образцы обрабатывали в растворе  $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:4$  в течение 60 с. Многослойную металлизацию Ti/Al/Ni с толщинами слоев 20/120/40 нм соответственно наносили на установке электронно-лучевого напыления STE EB71M (ЗАО «НТО», Россия) с применением предварительной ионной очистки в течение 30 с.

Быстрый термический отжиг образцов проводили на установке ASMasterS20HT (ANNEALSYS, Франция) в среде азота ( $N_2$ ). Температуру БТО варьировали в диапазоне от 850 до 900 °С с шагом 12,5 °С. Время отжига составляло 60 с.

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) и сопротивления контактов проводили с помощью анализатора силовых полупроводниковых приборов B1506A («Keysight», США). Величину удельного контактного сопротивления определяли исходя из полученных значений сопротивлений согласно методу длинной линии по формуле

$$\rho_c = R_c \cdot L_t \cdot W, \quad (1)$$

где  $R_c$  – контактное сопротивление, определяемое измерениями по МДЛ, Ом;  $L_t$  – эффективная длина контакта, также определяемая по МДЛ, мкм;  $W$  – ширина контактной площадки, составляющая 100 мкм.

Распределение элементов в области контакта проводили методом вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС) на времяпролетном масс-спектрометре вторичных ионов TOF.SIMS 5 («IONTOF», Германия). Травление образцов осуществляли ионами цезия при ускоряющем напряжении 2 кВ. Анализ вещества осуществляли ионами висмута при ускоряющем напряжении 30 кВ. По результатам анализа образцов, с помощью программного модуля установки TOF.SIMS 5 получали изображения областей контакта с распределением элементов по глубине.

### Результаты и их обсуждение

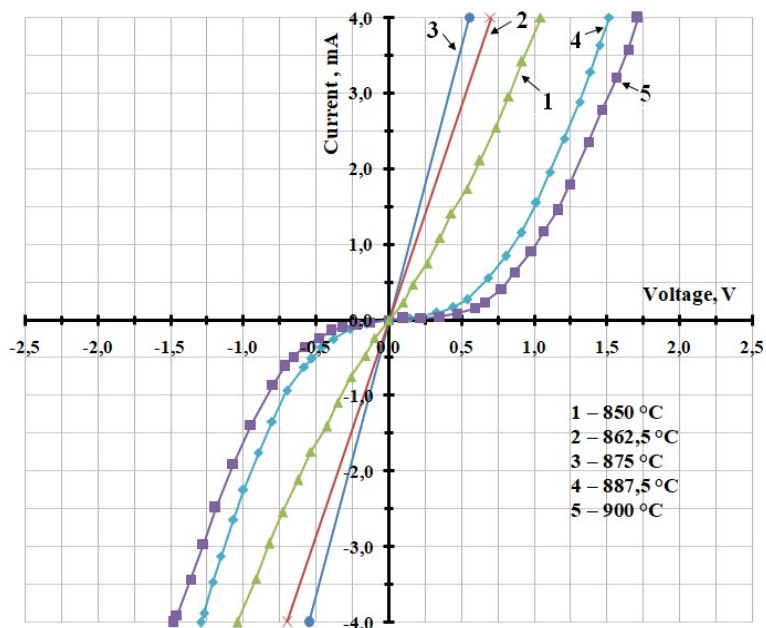
1. *Электрофизические свойства.* При измерении электрофизических характеристик исходных образцов наблюдался контакт с сопротивлением более 1 МОм, что, очевидно, связано с наличием высокоомного слоя ГС между металлизацией и ДЭГ. После БТО образцов при температуре 850 °С появляется нелинейность ВАХ (рис. 2), что связано с уменьшением толщины высокоомного слоя ГС между металлизацией и ДЭГ.

При увеличении температуры БТО от 862,5 до 875 °С наблюдалась линейная ВАХ с удельным контактным сопротивлением от  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-4}$  Ом·см<sup>2</sup>, что, вероятно, обусловлено дальнейшим уменьшением толщины высокоомного слоя ГС между металлизацией и ДЭГ. При увеличении температуры БТО выше 875 °С электрофизические свойства контакта начинают ухудшаться, а ВАХ снова становится нелинейной, что однозначно связано с деградиационными процессами в ГС.

2. *Распределение элементов.* Результаты ВИМС исследований распределения элементов (табл. 1) подтверждают ранее сделанные выводы о влиянии толщины высокоомного слоя ГС на характеристики контакта. На исходных образцах между металлизацией и ДЭГ располагается слой ГС толщиной порядка 25 нм, препятствующий формированию качественного омического контакта.

После БТО при температуре 850 °С имеет место взаимодействие компонентов металлизации друг с другом и ГС, а толщина слоя ГС под контактом уменьшается до 15–20 нм. При температуре БТО 875 °С взаимодействие компонентов металлизации с ГС достигают области ДЭГ. При этом толщина слоя ГС под контактом уменьшается до нескольких единиц нанометров. Это способствует туннелированию носителей заряда и, следовательно, формированию качественного омического контакта.

При температуре БТО 900 °С все слои металлизации активно перемешиваются, вступают во взаимодействие друг с другом и слоями ГС, а Ga из слоев GaN и AlGaIn начинает перемещаться к поверхности и испаряться. При этом область ДЭГ деградирует, что приводит к катастрофическому росту контактного сопротивления и, следовательно, невозможности формирования омического контакта.



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики контакта после БТО в диапазоне температур 850–900 °С, 60 с в среде азота: 1 – 850 °С; 2 – 862,5 °С; 3 – 875 °С; 4 – 887,5 °С; 5 – 900 °С

**Fig. 2.** Current-voltage characteristics of contact after RTA in the temperature range of 850–900 °C, 60 s in nitrogen atmosphere: 1 – 850 °C; 2 – 862,5 °C; 3 – 875 °C; 4 – 887,5 °C; 5 – 900 °C

**Таблица 1.** Распределение элементов по толщине гетероструктуры в области контакта  
**Table 1.** Distribution of elements over the thickness of the heterostructure in the contact area

Элементы/ Elements	Режим БТО / RTA operating mode			
	без БТО по RTA	БТО 850 °С RTA 850 °С	БТО 875 °С RTA 875 °С	БТО 900 °С RTA 900 °С
Ni Al Ti AlGaN GaN				
Ni				
Al				
Ti				

Таким образом, установлено, что при проведении БТО металлизации Ti/Al/Ni к ГС GaN/AlGaN при температуре от 862,5 до 875 °С происходит уменьшение толщины высокоомного слоя ГС между металлизацией и ДЭГ до нескольких единиц нанометров, а также взаимодействие компонентов металлизации как друг с другом, так и с областью ДЭГ, что позволяет формировать качественный омический контакт с удельным сопротивлением порядка  $1 \cdot 10^{-4}$  Ом·см<sup>2</sup>.

### Заключение

Установлено влияние температуры быстрого термического отжига на электрофизические свойства омического контакта металлизации Ti/Al/Ni к гетероструктуре GaN/AlGaN. На исходных образцах между металлизацией и двумерным электронным газом располагается высокоомный слой гетероструктуры толщиной порядка 25 нм, препятствующий формированию омического контакта. После быстрого термического отжига при температуре менее 862,5 °С происходит взаимодействие компонентов металлизации друг с другом и гетероструктурой, приводящее к уменьшению толщины высокоомного слоя гетероструктуры до 15–20 нм и нелинейности вольт-амперных характеристик. При температуре быстрого термического отжига от 862,5 до 875 °С толщина высокоомного слоя гетероструктуры уменьшается до нескольких единиц нанометров за счет взаимодействия компонентов металлизации Ti/Al/Ni с гетероструктурой, что способствует туннелированию носителей заряда и формированию качественного омического контакта с удельным сопротивлением порядка  $1 \cdot 10^{-4}$  Ом·см<sup>2</sup>. При увеличении температуры быстрого термического отжига более 875 °С взаимодействие компонентов металлизации и гетероструктуры происходит по всей глубине, двумерный электронный газ деградирует, а вольт-амперная характеристика контакта становится нелинейной.

Полученные результаты могут быть использованы в технологии создания изделий на основе GaN с двумерным электронным газом.

### Список литературы / References

1. Liu A.-C., Tu P.-T., Langpoklakpam C., Huang Y.-W., Chang Y.-T., Tzou A.-J., Hsu L.-H., Lin C.-H., Kuo H.-C., Chang E.Y. The evolution of manufacturing technology for gan electronic devices. *Micromachines*. 2021;12:737. DOI: 10.3390/mi12070737.
2. Greco G., Iucolano F., Roccaforte F. Ohmic contacts to Gallium Nitride materials. *Applied Surface Science*. 2016;383:24-345. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.04.016.
3. Placidi M., Pérez-Tomás A., Constant A., Rius G., Mestres N., Millán J. & Godignon P. Effects of cap layer on ohmic Ti/Al contacts to Si<sup>+</sup> implanted GaN. *Applied Surface Science*. 2009;255(12):6057-6060. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.12.084.
4. Seo H.-C., Chapman P., Cho H.-I., Lee J.-H. & Kim K. (Kevin). Ti-based nonalloyed Ohmic contacts for Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>N/GaN high electron mobility transistors using regrown n<sup>+</sup>-GaN by plasma assisted molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2008;93(10):102102. DOI: 10.1063/1.2979702.
5. Lee H.-S., Lee D. S. & Palacios T. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> High-Electron-Mobility Transistors Fabricated Through a Au-Free Technology. *IEEE Electron Device Letters*. 2011;32(5):623-625. DOI: 10.1109/led.2011.2114322.
6. Li Y., Ng G.I., Arulkumaran S., Kumar C.M.M., Ang K.S., Anand M. J., Wang, H., Hofstetter R., Ye G. Low-Contact-Resistance Non-Gold Ta/Si/Ti/Al/Ni/Ta Ohmic Contacts on Undoped AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> High-Electron-Mobility Transistors Grown on Silicon. *Applied Physics Express*. 2013;6(11):116501. DOI: 10.7567/apex.6.116501.
7. Greco G., Giannazzo F., Iucolano F., Lo Nigro R. & Roccaforte F. Nanoscale structural and electrical evolution of Ta- and Ti-based contacts on AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures. *Journal of Applied Physics*. 2013;114(8):083717. DOI: 10.1063/1.4819400.
8. Schroder, Dieter K. *Semiconductor material and device characterizatio*. Third Edition. USA: A Wiley-Interscience Publication; 2006:141-142.

### Вклад авторов

Юник А.Д. изготовил экспериментальные образцы, выполнил электрофизические измерения, анализ и интерпретацию полученных результатов.

Соловьёв Я.А. осуществил постановку задачи, анализ и интерпретацию полученных результатов.

Жигулин Д.В. выполнил анализ образцов методом ионной масс-спектропии и интерпретировал полученные результаты.

### Authors' contribution

Yunik A.D. made experimental samples, as well as performed electrophysical measurements, analysis and interpretation of the results.

Solovjov Ja.A. carried out the statement of the problem, as well as performed analysis and interpretation of the results.

Zhyhulin D.V. performed samples analysis by ion mass spectroscopy and interpreted the results.

### Сведения об авторах

Юник А.Д., ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Соловьёв Я.А., к.т.н., доцент, заместитель директора филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Жигулин Д.В., начальник сектора ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

### Information about the authors

Yunik A.D., Leading Engineer of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Solovjov Ja.A., Cand. of Sci., Associate Professor, Deputy Director of the “Transistor” Branch of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Zhyhulin D.V., Head of the Sector of SC “Belmicroanalysis” of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

### Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Корженевского, д. 16, к. 247,  
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», отраслевая лаборатория новых технологий и материалов;  
тел. +375-29-854-66-51;  
e-mail: a.unik.gan@gmail.com  
Юник Андрей Дмитриевич

### Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,  
Minsk, Korzhenevskogo St., 16, r. 247,  
JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company, Branch Laboratory of New Technologies And Materials;  
tel. +375-29-854-66-51;  
e-mail: a.unik.gan@gmail.com  
Yunik Andrei Dmitrievich