



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-14-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.323

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ВЕЛИЧИНУ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ МЕТАЛЛИЗАЦИИ Ti/Al/Ni/Au К ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ GaN/AlGaN

А. Д. ЮНИК, Я. А. СОЛОВЬЁВ

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

Поступила в редакцию 18.07.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Аннотация. Измерениями по методу длинной линии установлено влияние условий быстрого термического отжига на величину удельного сопротивления омических контактов металлизации Ti/Al/Ni/Au с толщинами слоев 20/120/40/40 нм к гетероструктуре GaN/AlGaN с двумерным электронным газом на сапфировой подложке. Быстрый термический отжиг образцов проводили контактным нагревом со стороны сапфировой подложки в среде азота при температуре в диапазоне от 750 до 1000 °С в течение 30, 60 и 90 с. Установлено, что зависимость удельного контактного сопротивления от температуры содержит два температурных оптимума, при которых удельное контактное сопротивление омического контакта составляет менее $1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см². Возникновение первого температурного оптимума обусловлено уменьшением расстояния от фронта диффузии низкоомного слоя интерметаллидов, образующегося при быстром термическом отжиге металлизации Ti/Al/Ni/Au, до области двумерного электронного газа. За пределами первого температурного оптимума наблюдается рост удельного контактного сопротивления до $9 \cdot 10^{-3}$ Ом·см², обусловленный поглощением слоя AlGaN низкоомным слоем интерметаллидов, что приводит к деградации двумерного электронного газа под контактами и ухудшению его проводящих свойств. Второй температурный оптимум обусловлен прохождением фронта диффузии области двумерного электронного газа и установлением бокового контакта между низкоомным слоем интерметаллидов и двумерным электронным газом, что приводит к уменьшению удельного контактного сопротивления. При увеличении времени быстрого термического отжига от 30 до 90 с наблюдается смещение интервала первого температурного оптимума с 800 до 775 °С для нижней границы и с 825 до 800 °С для верхней, а второго температурного оптимума – с 875 до 850 °С для нижней границы и с 950 до 875 °С для верхней, что обусловлено эквивалентным увеличением глубины диффузии компонентов металлизации Ti/Al/Ni/Au. 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. Влияние условий быстрого термического отжига на величину удельного сопротивления омических контактов металлизации Ti/Al/Ni/Au к гетероструктуре GaN/AlGaN / А. Д. Юник, Я. А. Соловьёв // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 8. С. 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-14-20>.

EFFECT OF RAPID THERMAL ANNEALING CONDITIONS ON THE SPECIFIC RESISTANCE OF THE OHMIC CONTACTS OF Ti/Al/Ni/Au METALLIZATION TO THE GaN/AlGaN HETEROSTRUCTURE

ANDREI D. YUNIK, JAROSLAV A. SOLOVJOV

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

Submitted 18.07.2022

Abstract. Effect of rapid thermal annealing conditions on the specific resistance of the ohmic contacts of Ti/Al/Ni/Au metallization with layer thicknesses of 20/120/40/40 nm to the GaN/AlGaN heterostructure with a two-dimensional electron gas on a sapphire substrate has been discovered by transmission line measurement. Rapid thermal annealing of the samples was carried out by the contact heating from the sapphire substrate side in a nitrogen atmosphere at the temperature range from 750 to 1000 °C for 30, 60, and 90 s. It has been discovered that the dependence of the specific contact resistance on the temperature contains two temperature optimums, at which the specific contact resistance of the ohmic contact is less than $1 \cdot 10^{-4}$ Ohm·cm². The appearance of the first temperature optimum is due to the decrease of the distance from the diffusion front of the low-resistance layer of intermetallic compounds formed during the rapid thermal annealing of the Ti/Al/Ni/Au metallization to the region of the two-dimensional electron gas. Outside the first temperature optimum, an increase in the specific contact resistance of up to $9 \cdot 10^{-3}$ Ohm·cm² is observed, due to the absorption of the AlGaN layer by a low-resistance layer of intermetallic compounds, which leads to the degradation of the two-dimensional electron gas under the contacts and deterioration of its conductive properties. The second temperature optimum is due to the passage of the diffusion front of the two-dimensional electron gas region and the establishment of a side contact between the low-resistance intermetallic layer and the two-dimensional electron gas, which leads to the decrease in the specific contact resistance. With an increase in the fast thermal annealing time from 30 to 90 s the shift of the interval of the first temperature optimum from 800 to 775 °C for the lower boundary and from 825 to 800 °C for the upper boundary, and for the second temperature optimum from 875 to 850 °C for the lower boundary, and from 950 to 875 °C for the upper boundary is observed, which is due to an equivalent increase in the diffusion depth of the Ti/Al/Ni/Au metallization components. 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 J. A. (2022) Effect of Rapid Thermal Annealing Conditions on the Specific Resistance of the Ohmic Contacts of Ti/Al/Ni/Au Metallization to the GaN/AlGaN Heterostructure. *Doklady BGUIR*. 20 (8), 14–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-14-20> (in Russian).

Введение

Одним из ключевых 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. В настоящее время среди многокомпонентных металлизаций для получения омического контакта к гетероструктурам на основе GaN наибольшее распространение получили металлизации на основе Ti/Al. Использование Ti и Al связано с их низкой работой выхода (4,33 и 4,28 эВ соответственно). Ti также активно вступает во взаимодействие с GaN при быстром термическом отжиге (БТО) с образованием на границе раздела соединений типа TiN, которые также обладают низкой работой выхода. Образование TiN дополнительно дает такое важное преимущество, как диффузия атомов азота из GaN (AlGaN), приводящая к образованию вакансий азота, которые, в свою очередь, являются донорами и увеличивают чистую концентрацию носителей под границей контакта. Кроме того, при БТО контактов на основе Ti уменьшается количество формирующегося на поверхности GaN (AlGaN) естественного оксида галлия (Ga₂O₃) [1, 2].

Среди многокомпонентных металлизаций на основе Ti/Al для омических контактов к гетероструктурам на основе GaN наиболее часто применяются два типа: без использования золота

(так называемая Au-free-технология) [3] и золотосодержащие многослойные структуры типа Ti/Al/X/Au, где в качестве X могут выступать Ni, Mo, Pt, Ti, Ta, Nb, Ir и др. [4].

На величину удельного сопротивления контактов к гетероструктурам GaN/AlGaN оказывает влияние целый ряд факторов, таких как толщина слоя AlGaN и содержания в нем Al, соотношение толщин слоев в многослойной металлизации, подготовка поверхности AlGaN перед проведением процесса напыления и др. Однако одни из наиболее значимых факторов – условия проведения БТО, а именно – скорость и температура нагрева, время термообработки и используемая газовая среда. Как правило, металлизации для формирования контактных структур к GaN (AlGaN) подвергаются БТО при температурах от 600 до 900 °С в течение 30–90 с в атмосфере азота [4].

Наиболее подходящим режимом нагрева подложек (в том числе структур на основе GaN) БТО является режим теплового баланса, характеризующийся временем нагрева более 1 с, при котором практически отсутствуют температурные градиенты по толщине подложки [5]. В большинстве современных промышленных систем БТО нагрев подложек осуществляют одно- или двусторонним некогерентным световым потоком [6]. Однако при данной схеме нагрева гетероструктур GaN/AlGaN с металлизацией на сапфировых подложках генерация тепла будет происходить в различных элементах ГС, главным образом в слоях с наибольшими коэффициентами поглощения света, как, например GaN [7]. Это приводит к градиентам температур между различными слоями гетероструктуры и сформированными в ней топологическими элементами, что, в свою очередь, обуславливает возникновение механических напряжений вплоть до разрушения ГС. Таким образом, наиболее перспективным способом нагрева гетероструктур GaN/AlGaN с металлизацией на сапфировых подложках является контактный нагрев с обратной стороны подложки на поверхности горячей плиты с заданной температурой [6].

В статье рассмотрено влияние температурно-временных условий БТО контактным нагревом с обратной стороны подложки на удельное сопротивление омических контактов металлизации Ti/Al/Ni/Au к гетероструктуре GaN/AlGaN с ДЭГ.

Методика проведения эксперимента

Использовали гетероструктуры GaN/AlGaN с ДЭГ на подложке сапфира диаметром 100 мм. Суммарная толщина слоев ГС составила порядка 3100 нм (рис. 1). Двумерный электронный газ характеризовался величиной подвижности основных носителей заряда порядка 2100 см²·В⁻¹·с⁻¹ при концентрации электронов 1,0 · 10¹³ см⁻², что обеспечивало слоиое сопротивление порядка 320 Ом/□.

Изоляцию элементов в ГС осуществляли мезаканавками глубиной порядка 700 нм. Травление слоев ГС выполняли плазмохимическим травлением в хлорсодержащей среде на установке ICP200ES (ЗАО «НТО», Россия). Многослойную металлизацию Ti/Al/Ni/Au с толщинами слоев 20/120/40/40 нм соответственно наносили на установке электронно-лучевого напыления STE EB71M (ЗАО «НТО») с применением предварительной очистки ионами аргона в течение 30 с. Омические контакты формировали методом взрывной (lift-off) фотолитографии.

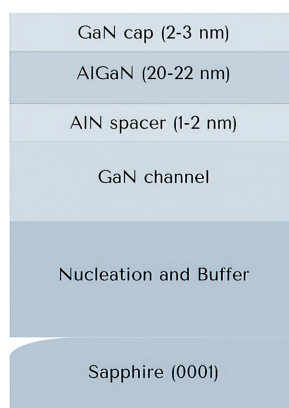


Рис. 1. Дизайн гетероструктуры
Fig. 1. Heterostructure design

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 $L_1 = 2$ мкм, $L_2 = 4$ мкм, $L_3 = 8$ мкм, $L_4 = 16$ мкм, $L_5 = 32$ мкм. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) и сопротивления контактов проводили с помощью анализатора силовых полупроводниковых приборов В1506А (Keysight, США).

Величину удельного контактного сопротивления определяли исходя из полученных значений сопротивлений согласно методу длинной линии по формуле

$$\rho_A = R_c L_t W, \quad (1)$$

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

Быстрый термический отжиг образцов проводили в среде азота на установке ASMaster S20HT (ANNEALSYS, Франция). Контактный нагрев образцов со стороны сапфировой подложки обеспечивали путем ее помещения в закрытый подложкодержатель из карбида кремния, который подвергали одностороннему нагреву кварцевыми галогенными лампами. Температуру подложкодержателя контролировали с точностью ± 1 °С при помощи термопары P130-039А типа К и высокотемпературного пирометра (рис. 2).

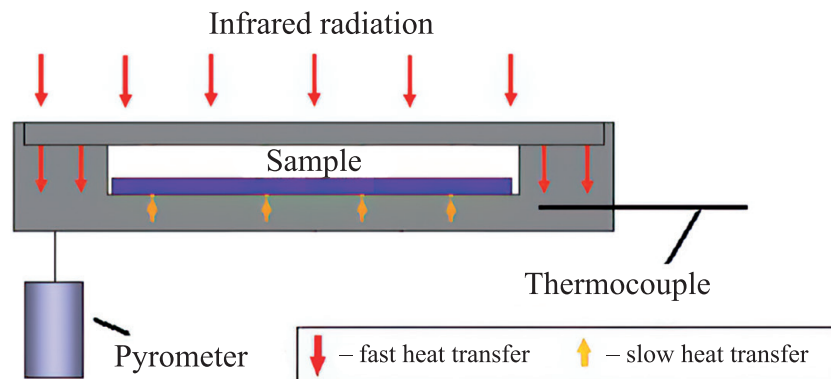


Рис. 2. Схема нагрева образца
Fig. 2. Sample heating technique

Температуру БТО варьировали в диапазоне от 750 до 1000 °С с шагом 25 °С. Скорость нагрева составляла порядка 20 °С/с. Время выдержки при соответствующей температуре отжига варьировали от 30 до 90 с с шагом 30 с.

Результаты исследований и их обсуждение

Величина удельного контактного сопротивления образцов до проведения БТО находилась на уровне более $1 \cdot 10^{-1}$ Ом·см², что, очевидно, связано с наличием высокоомного слоя AlGaIn между металлизацией и ДЭГ. При БТО в течение 30 с по мере повышения температуры БТО от 750 до 800 °С наблюдалось резкое уменьшение удельного контактного сопротивления с 10^{-2} Ом·см² до $3 \cdot 10^{-5}$ Ом·см² (рис. 3). Дальнейшее повышение температуры БТО до 850 °С привело к росту удельного контактного сопротивления до $1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см². Повышение температуры БТО до 875 °С снова привело к уменьшению удельного контактного сопротивления до $4 \cdot 10^{-5}$ Ом·см², а затем при повышении температуры БТО до 1000 °С величина удельного контактного сопротивления вновь монотонно возросла до $2 \cdot 10^{-4}$ Ом·см². Таким образом, при длительности БТО 30 с зависимость удельного контактного сопротивления от температуры содержит два температурных оптимума, при которых его значение не превышает величину $1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см². Первый из них наблюдается в диапазоне температур от 800 до 825 °С, второй – от 875 до 950 °С.

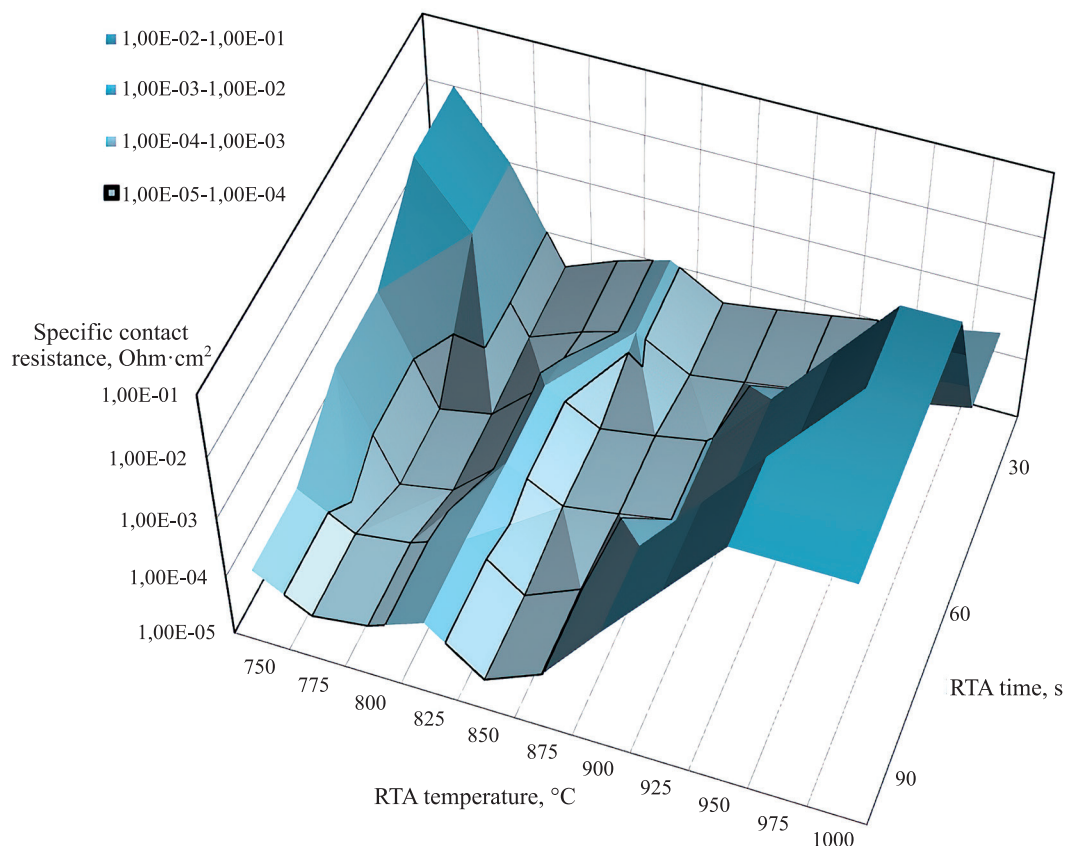


Рис. 3. Зависимость удельного контактного сопротивления от температуры и времени выдержки быстрого термического отжига

Fig. 3. Dependence of RTA temperature and RTA time on the specific contact resistance

Механизм возникновения двух температурных оптимумов может быть объяснен с точки зрения этапов прохождения фронта диффузии низкоомного слоя интерметаллидов, который образуется в процессе БТО многокомпонентной металлизации. На первом этапе по мере повышения температуры БТО расстояние от фронта диффузии низкоомного слоя интерметаллидов до области ДЭГ уменьшается, что приводит к уменьшению удельного контактного сопротивления (первый температурный оптимум). Затем при повышении температуры БТО фронт диффузии низкоомного слоя интерметаллидов приближается достаточно близко к области ДЭГ за счет поглощения слоя AlGaIn, который играет ключевую роль в формировании ДЭГ. Таким образом, ДЭГ под контактами начинает деградировать, его проводящие свойства ухудшаются, и, соответственно, удельное контактное сопротивление начинает увеличиваться. После того как фронт диффузии полностью проходит область ДЭГ, начинает устанавливаться боковой контакт низкоомного слоя интерметаллидов к ДЭГ, приводящий к уменьшению удельного контактного сопротивления (второй температурный оптимум). При дальнейшем повышении температуры БТО происходит значительная деградация основных слоев гетероструктуры (GaIn, AlGaIn), обусловленная диффузией галлия [3], что приводит к росту удельного контактного сопротивления.

При длительности БТО 60 с наблюдается схожий характер зависимости удельного контактного сопротивления от температуры с той разницей, что первый температурный оптимум находится в диапазоне температур от 775 до 800 °С, а второй – от 850 до 900 °С. Смещение диапазона температурных оптимумов при увеличении длительности БТО от 30 до 60 с в область более низких температур объясняется эквивалентным увеличением глубины диффузии компонентов металлизации Ti/Al/Ni/Au.

Аналогичный вышерассмотренным случаям характер зависимости удельного контактного сопротивления от температуры наблюдается и для времени БТО 90 с. При этом диапазон первого температурного оптимума составляет от 775 до 800 °С, а второго – от 850 до 875 °С, что также подтверждает вывод об эквивалентном увеличении глубины компонентов металлизации Ti/Al/Ni/Au.

Таким образом, при БТО гетероструктур GaN/AlGaN с ДЭГ на сапфировой подложке контактным нагревом с обратной стороны в диапазоне температур от 750 до 900 °С могут быть получены омические контакты с величиной удельного контактного сопротивления от $2 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см².

Заключение

1. Установлены закономерности влияния температурно-временных условий быстрого термического отжига контактным нагревом с обратной стороны подложки на удельное сопротивление омических контактов металлизации Ti/Al/Ni/Au к гетероструктуре GaN/AlGaN с двумерным электронным газом.

2. Зависимость удельного контактного сопротивления от температуры содержит два температурных оптимума, при которых удельное контактное сопротивление омического контакта составляет менее $1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см². Возникновение первого температурного оптимума обусловлено уменьшением расстояния от фронта диффузии низкоомного слоя интерметаллидов, образующегося при быстром термическом отжиге металлизации Ti/Al/Ni/Au, до области двумерного электронного газа. За пределами первого температурного оптимума наблюдается рост удельного контактного сопротивления до $9 \cdot 10^{-3}$ Ом·см², обусловленный поглощением слоя AlGaN низкоомным слоем интерметаллидов, что приводит к деградации двумерного электронного газа под контактами и ухудшению его проводящих свойств. Второй температурный оптимум обусловлен прохождением фронта диффузии области двумерного электронного газа и установлением бокового контакта между низкоомным слоем интерметаллидов и двумерным электронным газом, что приводит к уменьшению удельного контактного сопротивления.

3. При увеличении времени быстрого термического отжига от 30 до 90 с наблюдается смещение интервала первого температурного оптимума с 800 до 775 °С для нижней границы и с 825 до 800 °С для верхней, а второго температурного оптимума – с 875 до 850 °С для нижней границы и с 950 до 875 °С для верхней, что обусловлено эквивалентным увеличением глубины диффузии компонентов металлизации Ti/Al/Ni/Au.

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

Список литературы / References

1. Zywiets T. K., Neugebauer J., Scheffler M. (1999) The Adsorption of Oxygen at GaN Surfaces. *Applied Physics Letters*. 74 (12), 1695–1697. DOI: 10.1063/1.123658.
2. Mohammad S. N. (2004) Contact Mechanisms and Design Principles for Alloyed Ohmic Contacts to n-GaN. *Journal of Applied Physics*. 95 (12), 7940–7953. DOI: 10.1063/1.1712016.
3. Yunik A. D., Solovjov Ja. A., Zhyhulin D. V. (2022) 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*. 20 (3), 13–19. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-3-13-19 (in Russian).
4. Greco Giuseppe, Iucolano Ferdinando, Roccaforte Fabrizio (2016) Ohmic Contacts to Gallium Nitride Materials. *Applied Surface Science*. 383, 324–345. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.04.016.
5. Borisenko V. E., Hesketh P. J. (1997) *Rapid Thermal Processing of Semiconductor*. New York, Springer Science. 358.
6. Doering R., Nishi Y. (2008) *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*. New York, CRC Press. 1722.
7. Cunningham R. D., Brander R. W., Knee N. D., Wickenden D. K. (1972) Variation of Photoluminescence with Carrier Concentration in GaN. *Journal of Luminescence*. 5 (1), 21–31. DOI: 10.1016/0022-2313(72)90032-4.
8. Schroder D. K. (2006) *Semiconductor Material and Device Characterization, 3rd ed.* USA, Wiley-Interscience Publ. 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.

Authors' contribution

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

Solovjov J. A. carried out the statement of the problem, performed analysis and interpretation of 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».

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Корженевского, 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

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 J. A., Cand. of Sci., Assistant Professor, Deputy Director of “Transistor” of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

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