



Получено: 8.02.2023 г. | Принято: 15.02.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.2.114.122>

Научная статья

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВЖИГАЕМЫХ И НЕВЖИГАЕМЫХ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАМ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

А.В.Неженцев¹, к.т.н., инженер, ORCID: 0000-0002-9670-5616 / neghaleshka@mail.ru
К.А.Царик¹, к.т.н., нач. лаб., ORCID: 0000-0002-8218-7774

Аннотация. В работе рассмотрены технологические особенности изготовления омических контактов с сопротивлениями от 0,025 до 0,4 Ом·мм к наногетероструктурам на основе нитрида галлия. Установлено, что невжигаемые омические контакты являются наиболее подходящими для освоения рабочих частот вплоть до терагерцового диапазона.

Ключевые слова: омический контакт, нитрид галлия, наногетероструктура

Для цитирования: А.В. Неженцев, К.А. Царик. Аналитический обзор методов получения вжигаемых и невжигаемых омических контактов к наногетероструктурам на основе нитрида галлия. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 2. С. 114-122. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.2.114.122>

Received: 8.02.2023 | Accepted: 15.02.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.2.114.122>

Original paper

ANALYTICAL REVIEW OF METHODS FOR PRODUCING ALLOYED AND NON-ALLOYED OHMIC CONTACTS TO GALLIUM NITRIDE NANOHETEROSTRUCTURES

A.V.Nethentsev¹, Cand. of Sci. (Tech), Engineer, ORCID: 0000-0002-9670-5616 / neghaleshka@mail.ru
K.A.Tsarik¹, Cand. of Sci. (Tech), Head of Laboratory, ORCID: 0000-0002-8218-7774

Abstract. The paper considers the technological features of manufacturing ohmic contacts with resistances from 0,025 to 0,4 Ohm·mm to nanoheterostructures based on gallium nitride. It has been established that non-burning ohmic contacts are the most suitable for mastering operating frequencies up to the terahertz range.

Keywords: ohmic contact, gallium nitride, nanoheterostructure

For citation: A.V. Nethentsev, K.A. Tsarik. Analytical review of methods for producing alloyed and non-alloyed ohmic contacts to gallium nitride nanoheterostructures. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 2. PP. 114-122. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.2.114.122>.

¹ ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники" / National Research University of Electronic Technology



ВВЕДЕНИЕ

Нитрид галлия (GaN), благодаря своим исключительным свойствам, является одним из самых перспективных материалов силовой электроники [1]. Выращивание нитрида галлия на подложке из кремния позволяет существенно улучшить отвод тепла и упростить обработку структур. Вопросу улучшения качества эпитаксиальных слоев нитрида галлия, выращенных на кремнии, посвящен ряд работ [2].

Главным требованием к омическим контактам является их низкое сопротивление (как сопротивление материала омических контактов, так и их контактное сопротивление к активным слоям гетероструктуры). Этому требованию отвечают невжигаемые омические контакты. Однако для их изготовления выращивается тонкий слой узкозонного полупроводника, это требует проведения дополнительного процесса эпитаксии. Более технологичным является вжигаемый омический контакт. В общем случае на величину сопротивления омического контакта влияет также концентрация носителей заряда в полупроводниковом слое [3]. Различные научные группы используют несколько подходов к технологии формирования омических контактов для получения качественных выходных характеристик транзисторов. В данной работе рассматривались основные особенности технологий вжигания металлизации и доращивания сильнолегированных пленок в контактных областях. Рассмотрены основные достижения в значениях контактных сопротивлений и крутизны транзисторов на основе нитридгаллиевых гетероструктур.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЖИГАЕМЫХ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАМ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Один из способов понижения сопротивления омических контактов является проведение температурной обработки, в ходе которой компоненты металлизации проникают в полупроводниковый слой. Полученные таким образом омические контакты называются вжигаемыми. Самой распространенной металлизацией является металлическая система на основе титана (Ti) и алюминия (Al).

В работе [4] рассмотрено влияние состояния границы раздела "металл - полупроводник" на уровень сопротивления омического контакта (Ti/Al/Ni/Au), сформированного к GaN на Si (111). Установлено, что протекание тока через контакт зависит также от структуры и электрических свойств прореагировавшего слоя. Металлизация Ti/Al/Ni/Au имела толщины 15/200/50/50 и 100/200/50/50 нм, контакт на основе первой металлизации показал лучшие

INTRODUCTION

Gallium nitride (GaN), due to its exceptional properties, is one of the most promising materials for power electronics [1]. Gallium nitride growing on a silicon substrate significantly improves heat dissipation and simplifies processing of structures. A number of papers are devoted to improve quality of gallium nitride epitaxial layers grown on silicon [2].

The main requirement for ohmic contacts is their low resistance (both resistance of the ohmic contact material and their contact resistance to the heterostructure active layers). Non-burning ohmic contacts meet this requirement. However, they require an additional epitaxy process to grow a thin layer of narrow-gap semiconductor. A more technologically advanced burnable ohmic contact is more suitable. In general, resistance value of the ohmic contact is also influenced by concentration of charge carriers in the semiconductor layer [3]. Several approaches to ohmic contact formation technology are used by different research teams to obtain high quality output characteristics of transistors. In this paper the main features of metallization burning and doping technologies of highly alloyed films in the contact areas have been considered. Major advances in contact resistance and steepness values of transistors based on nitride gallium heterostructures are considered.

OPTIMISATION OF THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING BURNABLE OHMIC CONTACTS FOR GALLIUM NITRIDE-BASED NANOSTRUCTURES

One way of decrease ohmic contacts resistance is to carry out a temperature treatment while metallisation components penetrate into the semiconductor layer. The resulting ohmic contacts are called burnt contacts. The most common metallisation is a titanium (Ti) and aluminium (Al) based metallisation system.

In [4] influence of the metal-semiconductor interface state on the ohmic contact resistance level (Ti/Al/Ni/Au) formed to GaN on Si (111) has been considered. It was found that current flow through the contact also depends on the structure and electrical properties of the reacted layer. The Ti/Al/Ni/Au metallization had thicknesses of 15/200/50/50 and 100/200/50/50 nm, and the contact based on the former metallization showed better electrical characteristics than the contact with 100 nm Ti. In particular, the contact resistivity values after annealing at 850 °C were $4.8 \cdot 10^{-5}$ and $3.5 \cdot 10^{-4}$ Ohm·cm² respectively. However, the sample with 15 nm Ti layer has more developed surface morphology, with a RMS roughness of 30.6 and 22.3 nm, respectively.

электрические характеристики, чем контакт с 100 нм Ti. В частности, значения удельного контактного сопротивления после отжига при 850 °C составили $4,8 \cdot 10^{-5}$ и $3,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² соответственно. Однако образец с 15 нм Ti имеет более развитую морфологию поверхности, среднеквадратичная шероховатость составила 30,6 и 22,3 нм соответственно. Также в работе были сделаны ПЭМ-изображения поперечного сечения двух образцов с 15 нм Ti, отожженных при 800 и 850 °C, и показаны на рис.1. Как видно из рис.1а в первом случае исходная слоистая структура размывается и перемешивается.

Совершенно иная микроструктура наблюдается в образце, отожженном при 850 °C (ПЭМ-изображение приведено на рис.1б). Очевидно, наличие четко различимых слоев. Самый верхний слой в основном содержит фазу AlNi, под ним темный (из-за присутствия Au) слой AlAu₄. Третий слой, исходя из результатов рентгеновского анализа, содержит соединения Ti-Al-Ni. Также в этом случае на границе раздела с подложкой формируется слой TiN толщиной 4–9 нм. Электрические свойства омических контактов определяет именно проводящий слой TiN, формирование которого зависит от ряда параметров технологического процесса, так в работе Якобса и Крамера [5] рассмотрен систематический подход к снижению сопротивления омических контактов Ti/Al/Ni/Au в структурах AlGaN/GaN. Все омические контакты были вида Ti/Al/Ni/Au, но отличались по толщине металлов, времени и температуре в процессе быстрого термического отжига.

Из рис.2а видно, что результаты исследования контактных систем на основе металлизации Ti/Al/Ni/Au показывают, что электрические свойства и морфология поверхности зависят от соотношения между толщиной Ti и Al. Увеличение толщины Al приводит к уменьшению контактного сопротивления. Коэффициент толщины, равный 6, дает наилучшие результаты. На рис.2б показаны результаты исследования влияния толщины титана на контактное сопротивление. Из рис.2с видно, что существует оптимальное значение толщины Ni, а увеличение или уменьшение толщины никеля ухудшает контактное сопротивление. Каждый образец был расколот на четыре части, которые были отожжены при 700, 800, 900 и 1000 °C в течение 30 с в атмосфере азота. Каждый раз наилучшие результаты были получены при 900 °C. На рис.2д показано более подробное исследование условий отжига для оптимальной схемы металлизации, состоящей из Ti/Al/Ni/Au (30/180/40/150 нм). Лучшие результаты были получены при температуре 900 °C в течение 30 с в атмосфере N₂. После серии экспериментов были

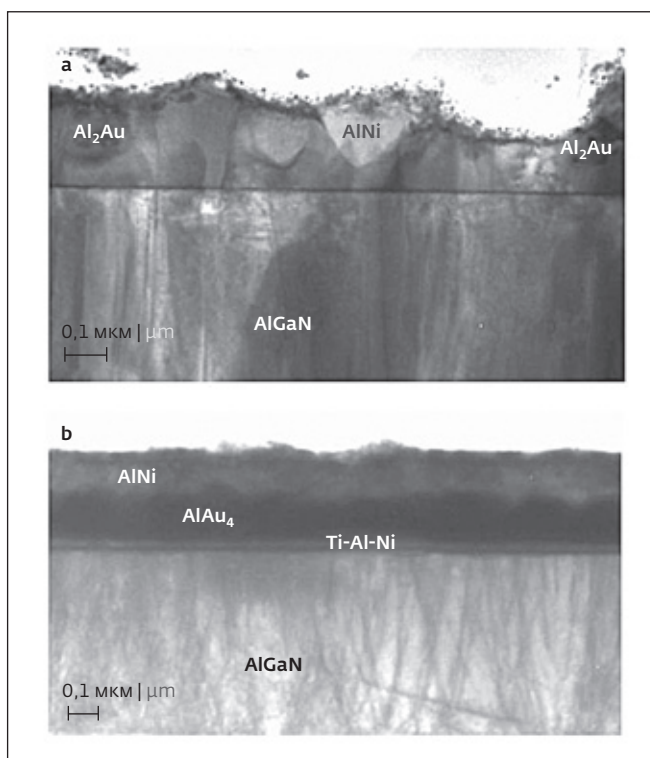


Рис.1. ПЭМ-изображения поперечного сечения образцов Ti/Al/Ni/Au (15/200/50/50 нм) на Si, отожженных при: а – 800 °C; б – 850 °C [4]

Fig.1. TEM images of the cross-section of the Ti/Al/Ni/Au samples (15/200/50/50 нм) on Si, annealed at: a – 800 °C; b – 850 °C [4]

Also the cross-sectional TEM images of two samples with 15 nm Ti annealed at 800 and 850 °C were taken and are shown in Fig.1. As can be seen in Fig.1a in the first case the original layered structure is eroded and mixed.

An entirely different microstructure can be observed in a sample annealed at 850 °C (see TEM image in Fig.1b). The presence of clearly distinguishable layers is evident. The uppermost layer mainly contains the AlNi phase, below it there is a dark (due to the presence of Au) AlAu₄ layer. The third layer, based on X-ray analysis, contains Ti-Al-Ni compounds. Also, in this case at the interface with the substrate a TiN layer with a thickness of 4–9 nm is formed. The electrical properties of ohmic contacts are determined precisely by the conductive TiN layer, formation of which depends on a number of process parameters, so in Jacobs and Kramer [5] a systematic approach to reduce resistance of Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts in AlGaN/GaN structures is considered. All the ohmic contacts were of Ti/Al/Ni/Au type but differed in metal thickness, time and temperature during rapid thermal annealing.

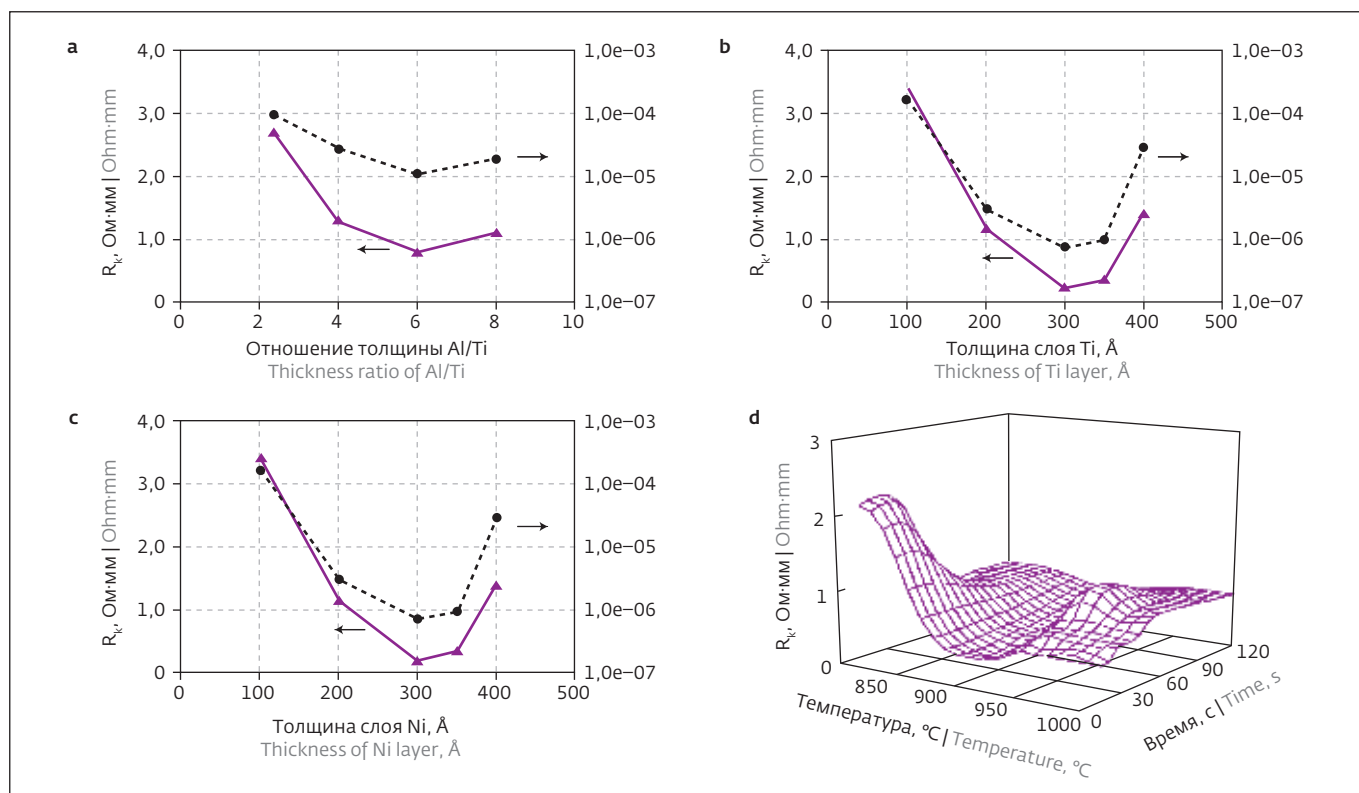


Рис.2. Контактное сопротивление в зависимости: а – от соотношения толщины Al/Ti; Ni=40 нм, Au=150 нм, вжигание 900 °С в течение 30 с, N₂; б – от толщины Ti; Al/Ti=6, Ni=40 нм, Au=150 нм; вжигание 900 °С в течение 30 с, N₂; с – от толщины Ni; Ti=30 нм, Al=180 нм, Ni+Al=190 нм, вжигание 900 °С в течение 30 с, N₂; д – от температуры и времени вжигания для оптимального контактного сопротивления в атмосфере N₂ [5]

Fig.2. Contact resistance as a function of: а – vs the thickness ratio Al/Ti; Ni=40 nm, Au=150 nm, burning at 900 °C during 30 s, N₂; б – vs thickness Ti; Al/Ti=6, Ni=40 nm, Au=150 nm, burning at 900 °C during 30 s, N₂; с – vs thickness Ni; Ti=30 nm, Al=180 nm, Ni+Al=190 nm; burning at 900 °C during 30 s, N₂; д – vs temperature and lifetime of burning for optimal contact resistance in N₂ air [5]

получены толщины и параметры термического отжига для снижения контактного сопротивления металлических контактов Ti/Al/Ni/Au. В итоге в данной работе оптимизированный контакт имел очень низкое контактное сопротивление 0,2 Ом·мм ($7,3 \cdot 10^{-7}$ Ом·см²) и следующие параметры для толщин 30/180/40/150 нм соответственно [5].

Для омических контактов на основе Ti и Al температура должна была быть выше 800 °С, чтобы достичь этого компромисса. Более детальное исследование влияния процесса термической обработки проведено в работе [6], образцы с контактной металлизацией Ti/Al/Mo/Au были отожжены при различных температурах в системе быстрого термического отжига (БТО). Температуру каждого процесса отжига меняли в диапазоне от 825 до 855 °С и для всех образцов выдерживали время отжига 60 с (рис.3а).

Как видно из рис.3а, температурная обработка проводилась в режиме быстрого термического отжига (БТО), то есть был реализован быстрый

It can be seen from Fig.2a that the results of studies of Ti/Al/Ni/Au metallisation-based contact systems show that electrical properties and surface morphology depend on the Ti layer thickness ratio to Al thickness. Increasing thickness of Al leads to decreasing of contact resistance. A thickness ratio of 6 shows the best results. Fig.2b presents the studied results of the influence of titanium thickness on contact resistance. From Fig.2c it can be seen that there is an optimum Ni thickness and that increasing or decreasing thickness of the nickel worsens the contact resistance value. Each sample was split into 4 pieces which were annealed at 700, 800, 900 and 1000 °C for 30 seconds in the nitrogen atmosphere. Each time the best results were obtained at 900 °C. Fig.2d shows a more detailed study of the annealing conditions for optimum metallisation pattern consisting of Ti/Al/Ni/Au (30/180/40/150 nm). The best results were obtained at 900 °C for 30 seconds in an N₂ atmosphere. After a series of experiments, thicknesses

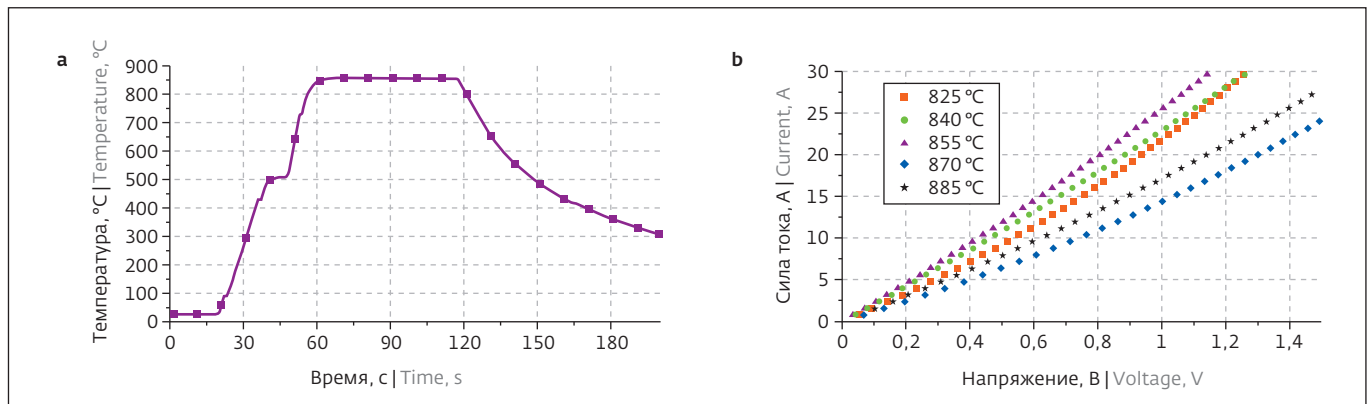


Рис.3. а – температурный профиль термической обработки при температуре 855 °С; б – вольт-амперные характеристики контакта на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au в зависимости от температуры отжига [6]
Fig.3. a – temperature profile of heat treatment at 855 °C; b – volt-ampere characteristics of Ti/Al/Mo/Au metallisation based contact as a function of annealing temperature [6]

нагрев и быстрое охлаждение. На рис.3б представлены вольт-амперные характеристики контакта на основе металлизации Ti/Al/Mo/Au в зависимости от температуры отжига. Уменьшение температуры термической обработки приводит к нелинейности. Это может означать, что на границе раздела "металл – полупроводник" остается барьер. Влияние температуры процесса термической обработки показывает, что наименьшее полное сопротивление при данном напряжении достигается при 855 °С. Однако повышение температуры отжига выше температуры 855 °С приводит к увеличению полного сопротивления. Но форма ВАХ остается слегка нелинейной.

Составы металлизации и параметры термической обработки для изготовления омических контактов к наногетероструктурам на основе нитрида галлия ряда исследований представлены в табл.1.

Особенностями технологии вжигаемых контактов являются: удовлетворительный уровень контактного сопротивления, высокая механическая и температурная стабильность, развитая морфология поверхности. Вжигаемый омический контакт является перспективным для силовых полупроводниковых приборов.

НЕВЖИГАЕМЫЕ ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ К НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАМ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

В последнее время набирают распространение методы изготовления невжигаемых контактов. На рис.4 представлена концепция изготовления невжигаемых селективно выращенных омических контактов. Поверхность наногетероструктуры травится через диэлектрическую маску SiO₂ на глубину ниже залегания проводящего

Таблица 1. Составы металлизации и параметры термической обработки для изготовления омических контактов к наногетероструктурам на основе нитрида галлия
Table 1. Manufacturing of metallisation compositions and heat treatment parameters for the ohmic contacts to gallium nitride-based nanoheterostructures

Металлизация Metallization	Параметры изготовления омических контактов Manufacturing parameters for ohmic contacts	
Ti/Al/Ni/Au (15/220/400/ 500 нм nm)	Параметры БТО: 900 °С в течение 30 с в атмосфере Ar RTA parameters: 900 °C for 30 sec in Ar atmosphere	[7]
Ti/Al/Ni/Au (30/100/300/ 300 нм nm)	Параметры БТО: 800 °С в течение 30 с в атмосфере Ar RTA parameters: 800 °C for 30 sec in Ar atmosphere	[8]
Ti/Au/Pd/Au (20/6/40/ 50 нм nm)	Параметры БТО: 800 °С в течение 30 с в атмосфере Ar RTA parameters: 800 °C for 30 sec in Ar atmosphere	[9]
Ni/Au (50/35 нм nm)	Температура БТО и время БТО варьировались RTA temperature and RTA time varied	[10]
(Ta,Ti)/Ni/Au (5/50/20/ 15 нм nm)	Параметры БТО: 750 °С в течение 45 с в атмосфере Ar RTA parameters: 750 °C for 45 sec in Ar atmosphere	[11]
Ti/Al/Mo/Au (15/60/35/ 50 нм nm)	Параметры БТО: 850 °С в течение 30 с в атмосфере N ₂ RTA parameters: 850 °C for 30 sec in N ₂ atmosphere	[12]

канала, показанного пунктирной линией, после чего в образовавшихся "окнах" выращивается p^+ -GaN. Благодаря введению примеси Si происходит вырождение полупроводящего слоя GaN, который должен находиться в непосредственном контакте с областью двумерного газа электронов (ДЭГ). Формирование контакта завершается металлизацией поверхности p^+ -GaN. Дорасширяемые контакты имеют ряд преимуществ перед вжигаемыми. Дорасширение производится путем гомоэпитаксии, что обеспечивает хорошую адгезию осаждаемого материала. Нитрид галлия и маска SiO_2 обладают хорошей температурной стойкостью, что обеспечивает сохранение изначальной формы контакта и позволяет точнее контролировать геометрию изготавливаемых транзисторов [13]. В последние годы были опубликованы сообщения о получении удельного сопротивления омических контактов до $0,4 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ для Ga-face HEMT [14] и до $0,09 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ [15], а затем до $0,025 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ [16] для N-face HEMT. Кроме того, сообщается о создании невжигаемых дорасширяемых контактов к структурам HEMT без вытравливания "окон" под осаждение p^+ -GaN [17], а также с применением селективного травления части барьерного слоя AlGaN, которое не затрагивает слой GaN [18].

В работе [19] рассматривалась эпитаксиальная гетероструктура AlGaN/GaN HEMT с ионной имплантацией кремния с дозой $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис.4).

Сопротивления структур были измерены методом длинной линии. Были получены следующие данные: контактное сопротивление $R_k = 0,96 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ и поверхностное сопротивление $R_{\text{ПП}} = 383 \text{ Ом}/\text{м}^2$.

Помимо селективного дорасширения все больше применений находит метод ионного легирования. В работе [20] проведена оценка несплавных омических контактов Cr/Pt/Au к эпитаксиальным структурам GaN и традиционных сплавных контактов Ti/Al/Ni/Au к гетероструктурам AlGaN/GaN с ионнолегированными контактными слоями. Контактное сопротивление составило: $2,8 \cdot 10^{-6}$ и $3,5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ соответственно. Таким образом, можно сделать вывод: технология невжигаемых омических контактов позволяет достигать низких сопротивлений, что делает такие контакты наиболее подходящими для СВЧ-транзисторов.

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА КРУТИЗНУ ВАХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

Важно оценить влияние величины контактного сопротивления на параметры полупроводниковых приборов. Один из таких параметров – крутизна. В последние годы наряду с усовершенствованием

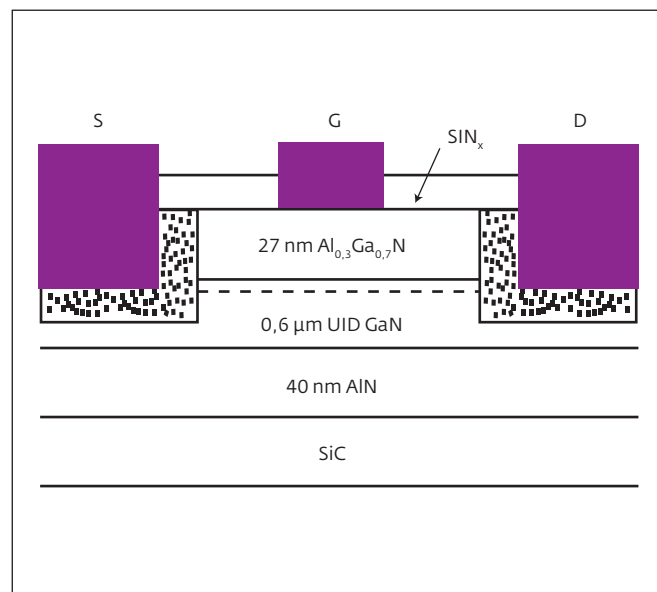


Рис.4. Схема структуры AlGaN/GaN HEMT [19]
Fig.4. Diagram of AlGaN/GaN HEMT structure [19]

and thermal annealing parameters were obtained to reduce the contact resistance value of Ti/Al/Ni/Au metal contacts. As a result, in this work, the optimized contact had a very low contact resistance of $0.2 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}$ ($7.3 \cdot 10^{-7} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$) and the following parameters for 30/180/40/150 nm thicknesses, respectively [5].

As to Ti and Al based ohmic contacts temperature had to be above $800 \text{ }^\circ\text{C}$ in order to achieve this compromise. A more detailed study of the heat treatment effect process was carried out in [6], Ti/Al/Mo/Au contact metallization samples were annealed at different temperatures in a Rapid Thermal Annealing (RTA) system. Temperature of each annealing process changes between $825 \text{ }^\circ\text{C}$ and $855 \text{ }^\circ\text{C}$ and an annealing time of 60 seconds was maintained for all samples (Fig.3a).

As can be seen from Fig.3a, temperature treatment was carried out in the RTA mode, i.e. fast heating and fast cooling were realised. Figure 3b shows the volt-ampere characteristics of a Ti/Al/Mo/Au metallisation-based contact as a function of annealing temperature. Decreasing heat treatment temperature leads to non-linearity. This could mean that a barrier remains at the metal-semiconductor interface. The temperature of heat treatment effect process shows that the lowest total resistance at a given voltage is achieved at $855 \text{ }^\circ\text{C}$. However, increasing annealing temperature above $855 \text{ }^\circ\text{C}$ leads to increasing the total resistance but the waveform remains slightly non-linear.

технологии плазмохимической обработки, формирования слоев металлизации и эпитаксиальных методов выращивания нитридных слоев, улучшаются и параметры СВЧ-транзисторов на основе нитрида галлия.

На рис.5 представлена зависимость крутизны полевого НЕМТ-транзистора от величины контактного сопротивления. Просматривается плавное снижение крутизны с увеличением контактного сопротивления. Рассматривались работы, посвященные как вжигаемым, так и невжигаемым омическим контактам. Наивысшее значение крутизны достигается в работе, посвященной невжигаемым контактам [16] и составляет 1105 мСм/мм. В целом приведенные данные демонстрируют значительно более высокую крутизну для НЕМТ-транзисторов с невжигаемыми контактами. Для транзисторов с вжигаемыми омическими контактами наибольшее значение крутизны составляет 400 мСм/мм. В целом, данные значения подтверждают перспективность решения задачи снижения контактного сопротивления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы представлено, что ожидать от нитридгаллиевого СВЧ-транзистора при различных значениях сопротивления омических контактов. В целом, данная задача является перспективной для силовых полупроводниковых приборов. Как видно из вышеизложенного, технология

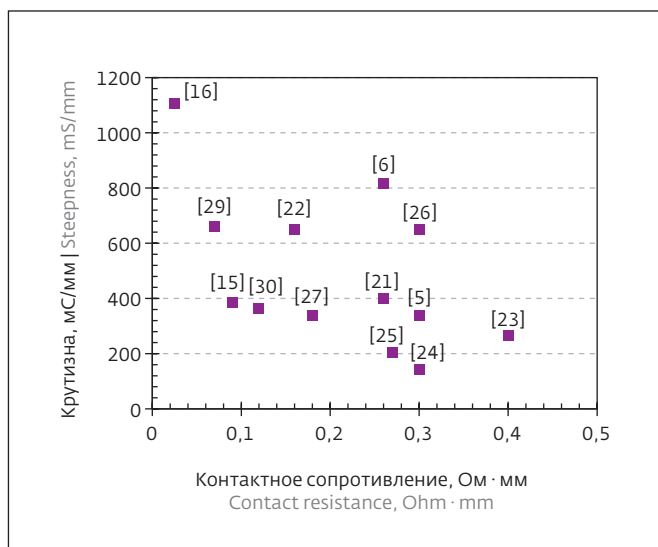


Рис.5. Зависимость крутизны полевого транзистора от величины контактного сопротивления стока и истока полевого транзистора [16, 21–27, 29, 30]

Fig.5. Dependence of field-effect transistor steepness on the contact resistance value of the field-effect transistor drain and source [16, 21–27, 29, 30]

The metallisation compositions and heat treatment parameters for manufacturing the ohmic contacts to gallium nitride-based nanoheterostructures of a number of studies are shown in Table 1.

The peculiarities of the burning contact technology are: satisfactory level of contact resistance, high mechanical and temperature stability, and developed surface morphology. The burnable ohmic contact is promising for power semiconductor devices.

NON- BURNING OHMIC CONTACTS TO GALLIUM NITRIDE-BASED NANOSTRUCTURES

Nowadays, methods of non-burnable contacts manufacturing have been gaining ground. Figure 4 shows the concept of non-burnable manufacturing, selectively grown ohmic contacts. The nanoheterostructure surface is annealed through a SiO₂ dielectric mask to a depth below the conductive channel shown with a dotted line, and then n⁺-GaN is grown in the resulting "windows". The introduction of Si admixture causes degeneration of GaN semiconducting layer, which should be in direct contact with the region of two-dimensional electron gas. Production of the contact is completed by the metallisation of the n⁺-GaN surface. There are a number of advantages to growing contacts over burning contacts. The re-growth was done by homoepitaxy, which ensures good adhesion of the deposited material. Gallium nitride and SiO₂ mask have good temperature resistance, which ensures that the original contact shape is maintained and allows for more precise control of manufactured transistors geometry [13]. In recent years, reports have been published on obtaining resistivity of ohmic contacts up to 0.4 Ohm·mm for "Ga-face" HEMT [14] and up to 0.09 Ohm·mm [15] and then up to 0.025 Ohm·mm [16] for "N-face" HEMT. In addition, it has been reported about non-burnable build-up contacts to HEMT structures without etching "windows" for n⁺-GaN deposition [17], and also using selective etching the part of the AlGaN barrier layer, which does not effect on GaN layer [18].

In [19] epitaxial AlGaN/GaN HEMT heterostructure with silicon ion implantation with a dose of $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ was considered (Fig.4).

The structures resistance were measured using the long line method. The following data were obtained: contact resistance $R_K = 0,96 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}$ and surface resistance $R_{\Pi\Pi} = 383 \text{ Ohm}/\text{M}^2$.

In addition to selective doping, the ion doping method is increasingly being used. In [20] evaluation of Cr/Pt/Au non-alloyed ohmic contacts to GaN epitaxial structures and conventional Ti/Al/Ni/Au alloyed contacts to AlGaN/GaN heterostructures with ion-doped contact layers were performed. Contact resistance was $2.8 \cdot 10^{-6}$ and $3.5 \cdot 10^{-7} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}^2$ respectively.



невжигаемых омических контактов позволила достигать низких сопротивлений, что делает такие контакты наиболее подходящими для СВЧ-транзисторов, особенно в условиях движения в нанометровый диапазон топологических размеров.

Полученные данные дают возможность с большой уверенностью предположить, что дальнейшее развитие технологии невжигаемых омических контактов к наногетероструктурам на основе нитрида галлия позволит приблизить освоение рабочих частот вплоть до терагерцового диапазона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках государственного задания FSMR-2022-0004.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Wu C.L. *et al.* Heteroepitaxy of GaN on Si (111) realized with a coincident-interface AlN/ β -Si₃N₄ (0001) double-buffer structure // *Applied physics letters*. 2003. Vol. 83, no. 22. PP. 4530-4532.
2. del Alamo J.A., Lee E.S. Stability and reliability of lateral GaN power field-effect transistors // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2019. Vol. 66, no. 11. PP. 4578-4590.
3. Cho S.M., Lee J.D., Lee H.H. Specific resistivity of ohmic contacts to n type direct band-gap III-V compound semiconductors // *Journal of applied physics*. 1991. Vol. 70, no. 1. PP. 282-287.
4. Roccaforte F. *et al.* Nanoscale carrier transport in Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts on AlGaIn epilayers grown on Si (111) // *Applied physics letters*. 2006. Vol. 89, no. 2. P. 022103.
5. Jacobs B. *et al.* Optimization of the Ti/Al/Ni/Au ohmic contact on AlGaIn/GaN FET structures // *Journal of Crystal Growth*. 2002. Vol. 241, no. 1-2. PP. 15-18.
6. Macherzynski W. *et al.* Formation process and properties of ohmic contacts containing molyb-

Thus it can be concluded: technology of non-burning ohmic contacts makes it possible to achieve low resistances, which makes such contacts the most suitable for microwave transistors.

INFLUENCE OF CONTACT RESISTANCE VALUE ON THE WAVELENGTH SLOPE OF GALLIUM NITRIDE FIELD-EFFECT TRANSISTORS

It is important to assess the impact of contact resistance values on semiconductor device parameters. One such parameter is the steepness. In recent years, along with improvements in plasma chemical processing technology, formation of metallization layers and epitaxial methods of growing nitride layers, improving the parameters of microwave transistors based on gallium nitride.

Figure 5 shows the dependence between the slope of the HEMT field effect transistor and the contact resistance. The steepness decreases smoothly with increasing contact resistance. Both fluxed and non-burning ohmic contacts have been considered. The highest value of steepness is achieved in the work on non-burning contacts [16] and is 1105 mS/mm. In general, the above data shows significantly higher steepness, for HEMT transistors with non-burning contacts. For transistors with burnt ohmic contacts the highest steepness value is 400 mS/mm. Moreover, these values confirm prospective of the contact resistance reduction problem.

CONCLUSIONS

This paper shows what can be expected from a nitride gallium microwave transistor at different values of ohmic contact resistance. In general, this is a promising challenge for power semiconductor devices. As can be seen from the above, non-burning ohmic contact technology has made it possible to achieve low resistances, making such contacts most suitable for microwave transistors, especially in the nanometer range of topological dimensions.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science as a part of state task FSMR-2022-0004.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

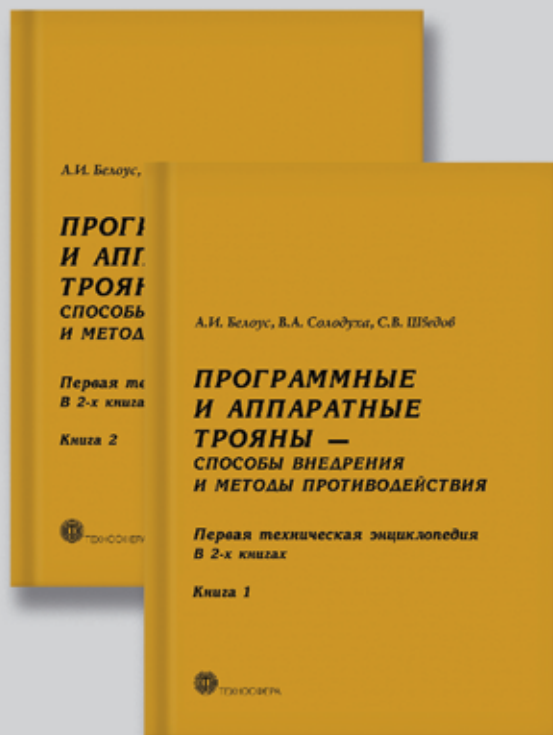
Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



- denum to AlGaIn/GaN heterostructures // *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2016. Vol. 14, no. 1. P. 83.
7. **Fan Z.** *et al.* Very low resistance multilayer Ohmic contact to n-GaN // *Applied Physics Letters*. 1996. Vol. 68, no. 12. PP. 1672-1674.
 8. **Mohammad S.N.** Contact mechanisms and design principles for alloyed ohmic contacts to n-GaN // *Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 95, no. 12. PP. 7940-7953.
 9. **Wang D.F.** *et al.* Low-resistance Ti/Al/Ti/Au multilayer ohmic contact to n-GaN // *Journal of Applied Physics*. 2001. Vol. 89, no. 11. PP. 6214-6217.
 10. **Motayed A.** *et al.* High-transparency Ni/Au bilayer contacts to n-type GaN // *Journal of applied physics*. 2002. Vol. 92, no. 9. PP. 5218-5227.
 11. **Motayed A.** *et al.* Electrical, microstructural, and thermal stability characteristics of Ta/Ti/Ni/Au contacts to n-GaN // *Journal of applied physics*. 2004. Vol. 95, no. 3. PP. 1516-1524.
 12. **Kumar V.** *et al.* Thermally-stable low-resistance Ti/Al/Mo/Au multilayer ohmic contacts on n-GaN // *Journal of applied physics*. 2002. Vol. 92, no. 3. PP. 1712-1714.
 13. **Майборода И.О.** и др. Селективный рост невжигаемых омических контактов к двумерному электронному газу в транзисторах с высокой подвижностью электронов на основе гетеропереходов GaN/AlGaIn методом молекулярно-пучковой эпитаксии // *Письма в Журнал технической физики*. 2014. Т. 40. № 11. С. 80-86.
 14. **Guo J.** *et al.* Metal/face InAlN/AlN/GaN high electron mobility transistors with regrown ohmic contacts by molecular beam epitaxy // *Physica status solidi (a)*. 2011. Vol. 208, no. 7. P. 1617-1619.
 15. **Denninghoff D.J.** *et al.* Design of High-Aspect-Ratio T-Gates on N-Polar GaN/AlGaIn MIS-HEMTs for High f_{max} // *IEEE Electron Device Letters*. 2012. Vol. 33, no. 6. PP. 785-787.
 16. **Dasgupta S.** *et al.* Self-aligned N-polar GaN/InAlN MIS-HEMTs with record extrinsic transconductance of 1105 mS/mm // *IEEE Electron Device Letters*. 2012. Vol. 33, no. 6. PP. 794-796.
 17. **Zheng Z.** *et al.* Nonalloyed ohmic contact of AlGaIn/GaN HEMTs by selective area growth of single-crystal n-GaN using plasma assisted molecular beam epitaxy // *Physica status solidi (a)*. 2011. Vol. 208, no. 4. PP. 951-954.
 18. **Pang L.** *et al.* High-current AlGaIn/GaN high electron mobility transistors achieved by selective-area growth via plasma-assisted molecular beam epitaxy // *Physica status solidi (a)*. 2014. Vol. 211, no. 1. PP. 180-183.
 19. **Recht F.** *et al.* Nonalloyed ohmic contacts in AlGaIn/GaN HEMTs by ion implantation with reduced activation annealing temperature // *IEEE electron device letters*. 2006. Vol. 27, no. 4. PP. 205-207.
 20. **Желаннов А.В.** и др. Омические контакты к приборным структурам на основе нитрида галлия // *Физика и техника полупроводников*. 2020. Т. 54. № 3. С. 247-249.
 21. **Xin H.P.** *et al.* Optimization of AlGaIn/GaN HEMT ohmic contacts for improved surface morphology with low contact resistance // *Poust W. Sutton D., Li D., Lam I. Smorchkova R., Sandhu B., Heying J., Uyeda M., Barsky M. Wojtowicz R. Lai // CS MANTECH Conf. Portland (Oregon, USA)*. 2010. PP. 149-152.
 22. **Yue Y.** *et al.* InAlN/AlN/GaN HEMTs with regrown ohmic contacts and f_T of 370 GHz // *IEEE Electron Device Letters*. 2012. Vol. 33, no. 7. PP. 988-990.
 23. **Liu Z.** *et al.* Mechanism of ohmic contact formation in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors using microwave annealing // *2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*. IEEE, 2016. PP. 1050-1052.
 24. **Song B.** *et al.* Ultralow-leakage AlGaIn/GaN high electron mobility transistors on Si with non-alloyed regrown ohmic contacts // *IEEE electron Device letters*. 2015. Vol. 37, no. 1. PP. 16-19.
 25. **Ganguly S.** *et al.* Plasma MBE growth conditions of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors on silicon and their device characteristics with epitaxially regrown ohmic contacts // *Applied Physics Express*. 2014. Vol. 7, no. 10. P. 105501.
 26. **Cui P., Zeng Y.** *Scaling Behavior of InAlN/GaN HEMTs on Silicon for RF Applications*. 2022.
 27. **Jiang Y.** *et al.* InAlN/GaN HEMTs on Si with 0.18 $\Omega \cdot \text{mm}$ Contact Resistance and 2,1-A/mm Drain Current Density // *2021 IEEE 14th International Conference on ASIC (ASICON)*. IEEE, 2021. PP. 1-4.
 28. **Çakmak H.** *et al.* Nonalloyed Ohmic Contacts in AlGaIn/GaN HEMTs With MOCVD Regrowth of InGaIn for Ka-Band Applications // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021. Vol. 68, no. 3. PP. 1006-1010.
 29. **Li L.** *et al.* GaN HEMTs on Si with regrown contacts and cutoff/maximum oscillation frequencies of 250/204 GHz // *IEEE Electron Device Letters*. 2020. Vol. 41, no. 5. PP. 689-692.
 30. **Lu H.** *et al.* Low Contact Resistance CMOS-Compatible RF GaN-on-Silicon HEMTs // *2021 IEEE 8th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*. IEEE, 2021. PP. 75-78.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.В. Шведов

Программные и аппаратные трояны – способы внедрения и методы противодействия. Первая техническая энциклопедия

Под общей редакцией А.И. Белоуса
В 2-х книгах

Книга 1
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 688 с.
ISBN 978-5-94836-524-4
Книга 2
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 630 с.
ISBN 978-5-94836-524-4

Цена 3700 руб.

Впервые в мировой научно-технической литературе в объеме одного комплексного издания последовательно и детально исследован феномен программных и аппаратных троянов, которые фактически являются технологической платформой современного и перспективного информационно-технического оружия (кибероружия). Материал энциклопедии представлен в виде 12 глав.

В первой вводной главе, обобщающей результаты анализа технических возможностей и ограничений современного оружия (атомного, космического, сейсмического, климатического, различных видов СВЧ-оружия), показано, что развитие всех «обычных» и «новейших» видов вооружений дошло до такой стадии, что их реальное использование на практике будет равносильно самоубийству начавшей войну стороны. Осознание этого факта привело к развитию информационно-технического оружия (кибероружия и нейрооружия).

В главе 2 детально исследованы концепции, методы, технические средства и примеры реализации этого вида оружия. В главе 3 рассмотрены основные виды программных троянов, вирусов и шпионских программ, которые в «кибероперациях» обычно действуют солидарно, защищая и помогая друг другу. В главе 4 наглядно показан эволюционный путь развития аппаратных троянов от «ящиков» и «коробочек» до микросхем, приведены примеры их применения в компьютерах, серверах, мобильных телефонах, автомобилях и даже в одежде и обуви человека. В главах с 5-й по 9-ю детально рассмотрены основные типы троянов в микросхемах, принципы их проектирования и работы, способы внедрения, методы их маскировки, выявления в микросхемах, а также защиты и противодействия. В главах с 10-й по 12-ю представлен детальный сравнительный ретроспективный анализ основ государственной политики в США и России в области обеспечения безопасности каналов поставки микросхем.

Книга ориентирована на широкий круг читателей: от инженеров, специалистов по информационной безопасности, чиновников министерств и ведомств до школьников и пенсионеров, активно использующих социальные сети.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosfera.ru
sales@technosfera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosfera.ru