

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ВЖИГАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАМ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

© А. В. Неженцев, В. Е. Земляков, В. И. Егоркин, В. И. Гармаш

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»  
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

В работе рассматриваются методы оптимизации вжигания омических контактов к наногетероструктурам на основе арсенида галлия. Исследовано влияние температуры, давления газа и времени вжигания с дополнительным отжигом на минимизацию сопротивления омического контакта. В результате отработки технологических операций оптимизирован процесс вжигания омических контактов к наногетероструктурам на основе арсенида галлия. Оптимизация режима термообработки омических контактов позволила уменьшить их контактное сопротивление до 0,15-0,13 Ом\*мм, что находится на уровне результатов зарубежных фабрики. Исследование влияния на контактное сопротивление к наногетероструктурам изменения температуры вжигания, потока газа и дополнительного отжига показало существование оптимальных параметров процессов, при которых уровень контактного сопротивления минимален и слабо зависит от незначительной вариации параметров технологического процесса.

**Ключевые слова:** омический контакт, наногетероструктура, метод передающей линии

**Сведения об авторах:** Неженцев Алексей Викторович; Земляков Валерий Евгеньевич, к.т.н., vzml@rambler.ru; Егоркин Владимир Ильич, к.т.н., доцент, egorkin@qdn.miee.ru; Гармаш Валентин Игоревич, garmashvalentine@gmail.com

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (задание № 2014/101)

---

## OPTIMIZATION OF OHMIC CONTACTS ANNEALING MODES IN GAAS NANOHETEROSTRUCTURES

A. V. Nezhentsev, V. E. Zemlykov, V. I. Egorkin, V. I. Garmash

National Research University «Moscow Institute of Electronic Technology»,  
124498, Moscow, Zelenograd, Shokina square, 1

Methods of optimization of ohmic contacts annealing in GaAs heterostructures are discussed in this paper. We studied the influence of temperature, gas pressure and time of additional annealing to minimize the resistance of ohmic contact. As a result of processing operations development annealing process of ohmic contacts to the GaAs heterostructure has been optimized. Optimization of the thermal processing could reduce ohmic contacts resistance to 0.15-0.13 Ohm\*mm, which is at the level of foreign foundry factories. Investigation of temperature changes, gas pressure and additional annealing effects on the contact resistance revealed the existence of optimal process parameters for which the level of the contact resistance is minimal and depends little on minor variations of technological process parameters.

**Keywords:** ohmic contact, nanoheterostructure, transmission line method

**Data of authors:** Nezhentsev Aleksey Viktorovich; Zemlykov Valery Evgenevich, Ph.D., vzml@rambler.ru; Egorkin Vladimir Ilich, Ph.D., associate professor, egorkin@qdn.miee.ru; Garmash Valentin Igorevich, garmashvalentine@gmail.com

**Acknowledgements:** Research was supported by the Ministry of Education and Science (task № 2014/101)

## **Введение**

Главными требованиями к омическим контактам являются их низкое сопротивление (как сопротивление материала омических контактов, так и их контактное сопротивление к активным слоям гетероструктуры), температурная стабильность и малая шероховатость поверхности. Для формирования омических контактов к наногетероструктурам на основе арсенида галлия характерно использование тонких слоёв Au, Ge, Ag, Ni, Pt, Pd, Ti и других материалов [1-5]. Для улучшения характеристик формируемых контактов производится их термообработка, во время которой атомы металла и полупроводника диффундируют в слои полупроводниковой наногетероструктуры. Это приводит к снижению контактного сопротивления между металлизацией омического контакта и активными слоями гетероструктуры. Характерные температуры процесса термической обработки омических контактов составляют от 350 до 550 °С. Как указано в [6], минимизация контактного сопротивления является очень сложной задачей, решение которой зависит от состава и толщины слоёв металлов, от характеристик полупроводниковой гетероструктуры, от параметров процесса термообработки. В этой работе описаны методы минимизации контактного сопротивления для рНЕМТ гетероструктуры с контактным слоем толщиной 50 нм, изготовленной в «Коннектор-Оптикс» (г. Санкт-Петербург), и системой металлизации AuGe-Ni-Au (30/10/300 нм) в зависимости от температуры, давления газа и времени вжигания с дополнительным отжигом. Также важным фактором является отказ от использования водорода в качестве инертной атмосферы и замена его баллонным азотом, что упрощает конструкцию оборудования и повышает безопасность персонала.

## **Условия проведения эксперимента**

Формирование металлизации омических контактов осуществлялось с применением контактной фотолитографии и вакуумного послойного нанесения металлизации в системе с электронно-лучевым распылением. Первым этапом процесса является подготовка

поверхности подложки арсенида галлия. Для этого последовательно выполняются операции отмывки пластины в диметилформамиде (ДМФА) и плазмохимической обработки в O<sub>2</sub> плазме. Химическая обработка в ДМФА позволяет удалить с поверхности подложки органические вещества, которые являются основным загрязняющим фактором, а воздействие кислородной плазмы позволяет провести более глубокую очистку и приводит к удалению остатков влаги с поверхности пластины, что необходимо для обеспечения хорошей адгезии наносимого слоя фоторезиста к арсениду галлия. Обработка в ДМФА осуществляется при температуре 20±2 °С в течение 3-5 минут, после чего поверхность пластины очищается в деионизованной воде в течение 3 минут.

После подготовки поверхности подложки на неё последовательно наносятся слои LOR (lift-off resist) и фоторезиста S1813. Нижний слой LOR обеспечивает необходимую при осуществлении операции «взрыва» резиста (lift-off) обратную геометрию системы резистов. Режимы нанесения и термообработки слоёв представлены в табл. 1.

В сформированной резистивной маске фотолитографией создаётся изображение топологии омических контактов и знаков совмещения. Для проявления маски используется 4 % раствор гидроксида тетраметиламмония (ТМАН). Его использование позволяет одновременно проявлять как верхний слой S1813, так и подслой LOR, что приводит к снижению дефектности формируемого изображения. После проявления производится термообработка резистивной маски в термическом шкафу при температуре 90 °С в течение 10 минут. Для удаления остатков материала резистивных слоёв в областях формирования омических контактов производится еще одна обработка поверхности подложки GaAs в кислородной плазме. Непосредственно перед напылением материала омических контактов производится обработка поверхности подложки в 5 % растворе соляной кислоты. Это позволяет удалить естественный окисел и загрязнения с поверхности GaAs подложки.

Для проведения процессов термической обработки полупроводниковых подложек, как

Таблица 1

**Параметры технологических операций нанесения резистивной маски для формирования омических контактов**

Операция		Резист	
		LOR 5A	S1813
Нанесение резиста	Скорость вращения центрифуги, об/мин	$V_1 = 600$ $V_2 = 2000$	$V = 2000$
	Время нанесения, сек	$t_1 = 5$ $t_2 = 30$	$t = 20$
Термообработка	Температура, °C	150±5	115±5
	Время, мин	2	1

правило, используются специальные печи, в которых нагрев происходит с помощью резистивных нагревателей. Используемая в работе печь (горячая плита), собственной разработки, схематически представлена на рис. 1. Температура термообработки регулируется током, протекающим через нагревательный элемент. Термопара располагается рядом с нагревателем. Вжигание контактов производится в атмосфере азота, что позволяет исключить взаимодействие атмосферы с нагретыми контактами. Пластина надвигается на область, прогретую нагревательным элементом, и после заданного времени сдвигается на холодную часть плиты.

Металлизация омических контактов формировалась на установке электронно-лучевого напыления металлов Kurt J. Lesker AXXIS. Измерение контактных сопротивлений производилось по методу передающей линии

(МПЛ) [7]. Перед измерениями производилась изоляция активных областей транзисторов, для чего в аммиачно-перекисном травителе формировались мезы тестовой МПЛ структуры с прямоугольными металлизированными областями шириной 100 мкм. Для экспериментов использовались гетероструктуры из одного эпитаксиального процесса диаметром 76 мм. После формирования металлизации и мезы пластину резали на части размером 1x1см<sup>2</sup> и проводили операцию вжигания контактов с вариацией температуры и атмосферы.

**Результаты эксперимента**

Следует заметить, что температура образца при вжигании всегда оказывается меньше, чем температура нагревательного элемента. На рис. 2 представлен график изменения температуры образца при заданной

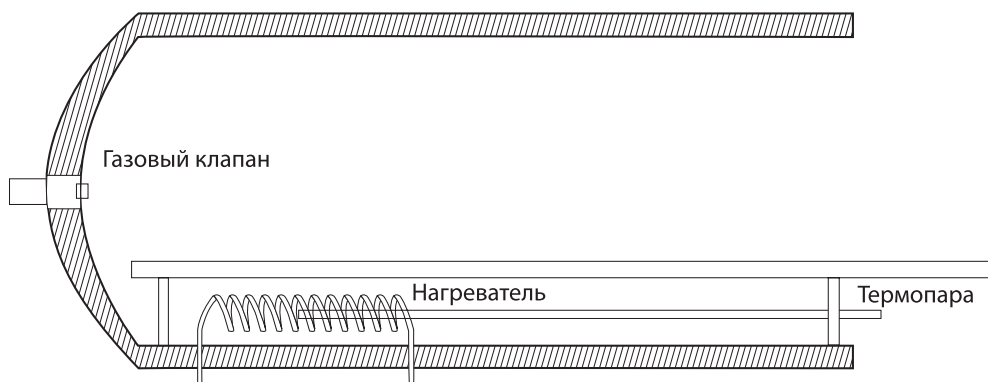


Рис. 1

**Схема установки для термообработки омических контактов**

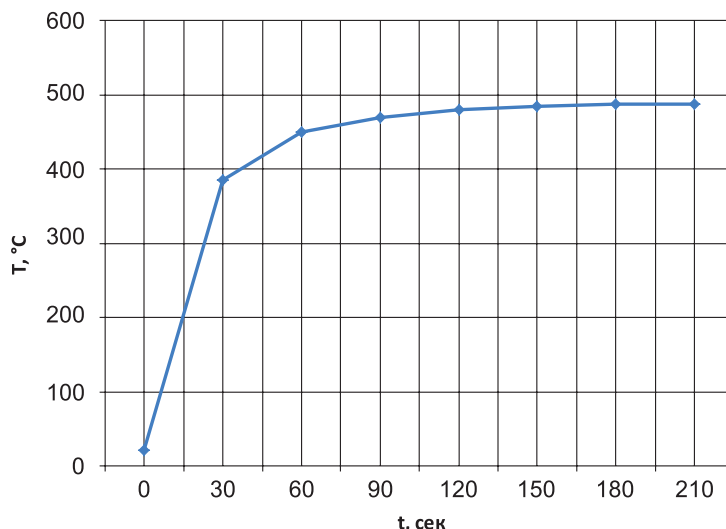


Рис. 2

**Зависимость температуры образца от времени нахождения на горячей плите при заданном потоке газа и температуре горячей плиты 500 °C**

температуре контрольного датчика 500 °C. Для точного контроля температуры термопара прижималась на поверхность образца.

Температура образца при задании температуры плиты сначала изменяется со скоростью более 10 °C/сек, затем скорость роста сильно замедляется и температура образца практически перестаёт расти после выдержки на плите более 2,5 минут. Наступает динамическое равновесие – темпера-

тура образца задаётся с помощью нагрева и потока газа, то есть поступление газа в печь также может определять условия, при которых происходят диффузные процессы.

Исходя из этих соображений, был поставлен эксперимент по исследованию влияния времени вжигания в диапазоне от 60 сек до 150 сек на уменьшение контактного сопротивления омических контактов (рис. 3). При меньшем време-

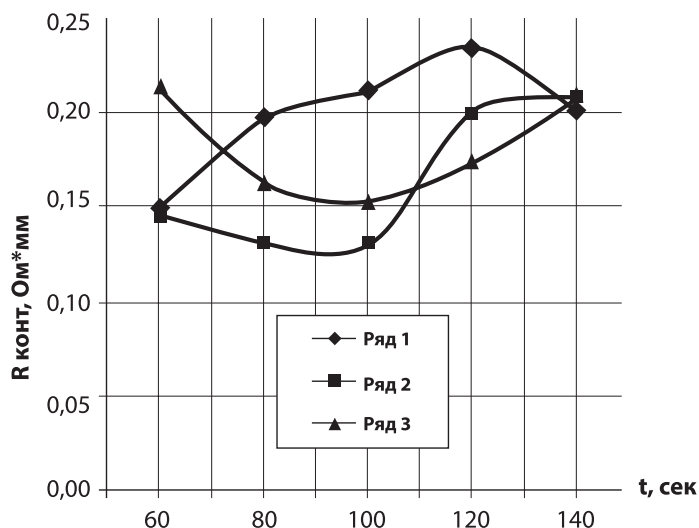


Рис. 3

**Результаты измерений контактных сопротивлений, полученные при различном времени вжигания омических контактов: ряд 1 – первоначальное вжигание, ряд 2 – дополнительный отжиг в течение 1 минуты, ряд 3 – ещё один дополнительный отжиг в течение 1 минуты**

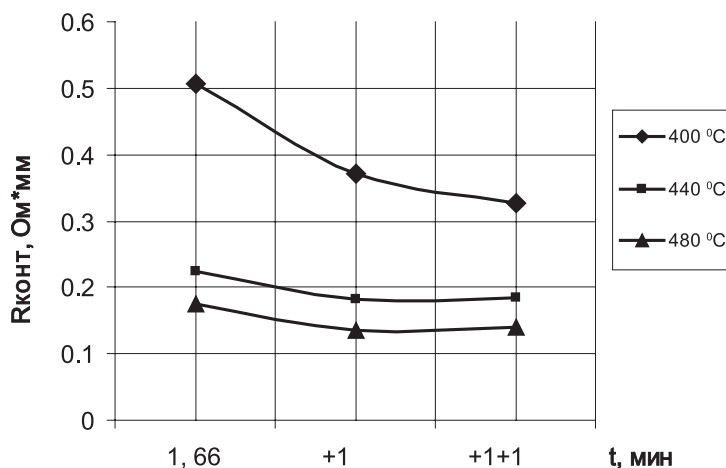


Рис. 4

**Исследование влияния времени первоначального вжигания (с более детальным рассмотрением диапазона от 1,2 мин до 1,5 мин) на уменьшение контактного сопротивления омических контактов**

ни вжигания контакты оставались нелинейными, при большем времени ухудшалась морфология, искажался край контакта, появлялись капельные образования.

При нелинейном омическом контакте дополнительный отжиг при увеличенном времени приводил к линейности, поэтому при проведении эксперимента те же образцы после заданного времени подвергались дополнительному отжигу, что позволило в ряде случаев минимизировать величину контактного сопротивления. Дополнительный отжиг проходил при температуре от 400 до 540 °C в течение

1 минуты, далее выдержка до комнатной температуры.

Из рис. 3 понятна необходимость дополнительного рассмотрения влияния дополнительного отжига при разных температурах. Рис. 4 и узкий временной промежуток первоначального вжигания в диапазоне от 1,2 мин до 1,5 мин (рис. 5) выбраны с целью установить более точное значение первоначального времени вжигания и температуры, при которых в дальнейшем можно будет получить минимальное значение для контактного сопротивления. Также было исследовано влияние изменения по-

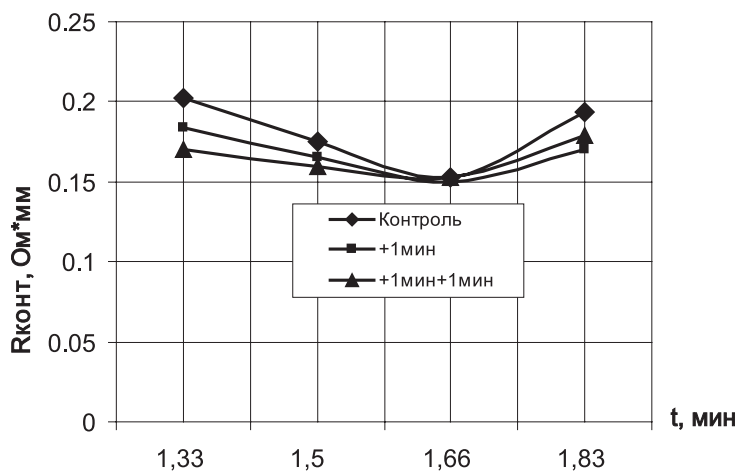


Рис. 5

**Результаты исследований контактного сопротивления при различном времени первоначального вжигания омических контактов во временном диапазоне от 1,2 мин до 1,5 мин**

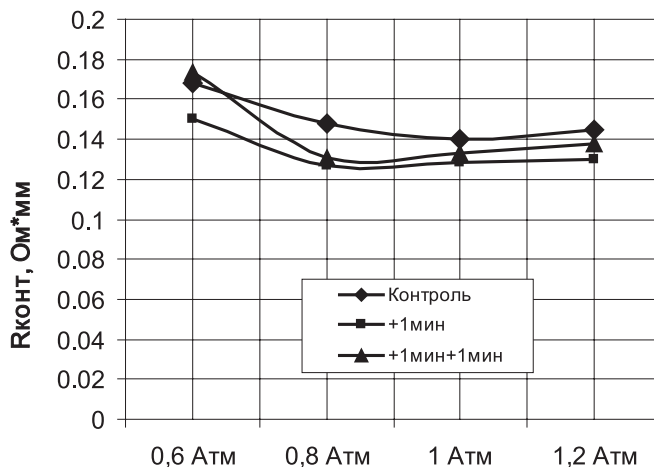


Рис. 6

**Результаты исследований контактного сопротивления при различном потоке газа и дополнительном вжигании**

тока инертного газа в диапазоне от 0,6 до 1,2 Атм. на контактное сопротивление (рис. 6).

Далее исследовалась зависимость контактного сопротивления к наногетероструктуре от температуры отжига (рис. 7). Имеется температурный диапазон минимального контактного сопротивления и качественно наш график совпадает с зависимостью из [8], но со сдвигом по температурной шкале, что можно объяснить разным расположением контрольного температурного датчика относительно нагревательного элемента и разной скоростью газового потока.

Рис. 5, 6 и 7 показывают очень важные, с точки зрения технологии СВЧ-транзисторов, результаты. Существует диапазон давлений газа 0.8-1.1 Атм, температур 470-490 °С и

времени вжигания около 100 сек, и при проведении вжигания в этих рамках результат будет слабо зависеть от условий проведения технологического процесса.

**Заключение**

В результате обработки технологических операций был оптимизирован процесс вжигания омических контактов к наногетероструктурам на основе арсенида галлия. Оптимизация режима термообработки омических контактов позволила уменьшить их контактное сопротивление до 0,15-0,13 Ом\*мм, что находится на уровне зарубежных фаундри фабрик. Исследование влияния на контактное со-

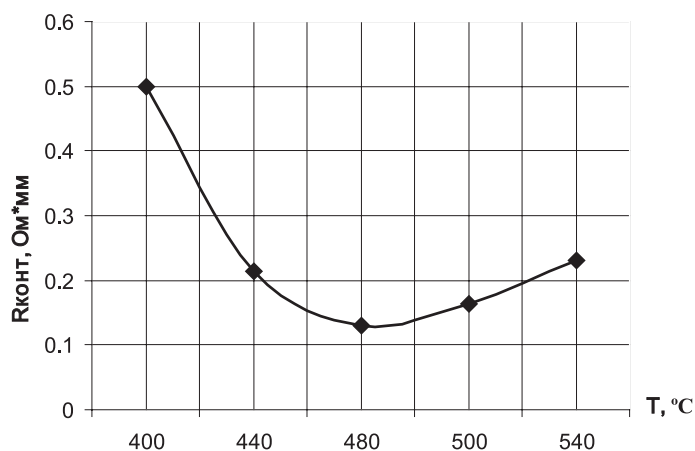


Рис. 7

**Зависимость контактного сопротивления от температуры горячей плиты**



противление к наногетероструктурам изменения температуры вжигания, потока газа и дополнительного отжига показало существование оптимальных параметров процесса, при которых уровень контактного сопротивления минимален и слабо зависит от вариации параметров.

### Литература

1. Иванов В. Н., Коваленко Л. Е., Сумская Т. С., Челюбеев В. Н., Яшник В. М. Морфология и структура вплавных омических контактов к электронному арсениду галлия // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 1988. – № 4 (195). – С. 49-53.
2. Iliadis A., Singer K. E. Metallurgical Behaviour of Ni/Au-Ge Ohmic Contacts to GaAs // Solid State Communications, 1984, vol. 49, pp. 99-101.
3. Wang L. C., Lau S. S., Hsieh E. K., Velebir J. R. Low-Resistance Nonspiking Ohmic Contact for AlGaAs/GaAs High Electron Mobility Transistors Using the Ge/Pd Scheme // Applied Physics Letters, 1989, vol. 54, pp. 2677-2679.
4. Jones K. A., Linfield E. H., Frost J. E. F. Contact Resistances of NiGeAu, PdGeTiPt, and TiPd Ohmic Contacts to GaAs and their Temperature Dependence from 4.2 to 350 K // Applied Physics Letters, 1996, vol. 69, pp. 4197-4199.
5. Каргин Н. И., Кузнецов А. Л., Сейдман Л. А., Чашкин Н. А., Шостаченко С. А. Формирование омических контактов в транзисторе с высокой подвижностью электронов с метаморфным гетеропереходом на основе арсенида галлия // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2014. – № 1 (232). – С. 72-81.
6. Шур М. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х книгах: [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1992. – 479 с.
7. Ивашук А. В. Тепловые режимы формирования омических контактов к арсениду галлия // Технология и конструирования в электронной аппаратуре. – 2000. – № 5-6. – С. 40-43.

### References

1. Ivanov V. N., Kovalenko L. E., Sumsкая T. S., Chelyubeev V. N., Yashnik V. M. Morphology and structure of annealed ohmic contacts to electron GaAs. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 1988, № 4, pp. 49-53.
2. Iliadis A., Singer K. E. Metallurgical Behaviour of Ni/Au-Ge Ohmic Contacts to GaAs // Solid State Communications, 1984, vol. 49, pp. 99-101.
3. Wang L. C., Lau S. S., Hsieh E. K., Velebir J. R. Low-Resistance Nonspiking Ohmic Contact for AlGaAs/GaAs High Electron Mobility Transistors Using the Ge/Pd Scheme // Applied Physics Letters, 1989, vol. 54, pp. 2677-2679.
4. Jones K. A., Linfield E. H., Frost J. E. F. Contact Resistances of NiGeAu, PdGeTiPt, and TiPd Ohmic Contacts to GaAs and their Temperature Dependence from 4.2 to 350 K // Applied Physics Letters, 1996, vol. 69, pp. 4197-4199.
5. Kargin N. I., Kuznetsov A. L., Seydman L. A., Chashkin N. A., Shostachenko S. A. Ohmic contact formation in metamorphic heterojunction GaAs HFET. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2014, № 1 (232), pp. 72-81.
6. Shur M. *Fizika poluprovodnikovyx priborov* [Physics of semiconductor devices]. Moscow, Mir Publ., 1992, 479 p.
7. Ivashchuk A. V. Thermal modes of ohmic contact formation in GaAs. *Tekhnologiya i konstruirovaniya v elektronnoy apparature* [Technology and design of electronic devices], 2000, № 5-6, pp. 40-43.