

Применение индия для формирования низкоомных микроконтактов к контактному слою арсенида галлия гетероэпитаксиальных QWIP-структур

А. В. Трухачев, М. В. Седнев, Н. С. Трухачева

Работа посвящена использованию индия для формирования низкоомных микроконтактов к контактному слою арсенида галлия гетероэпитаксиальных QWIP-структур для изготовления матричного фотоприёмника излучения ИК-диапазона. В технологии изготовления фоточувствительных элементов металлические контакты к контактному слою GaAs нижнего и верхнего уровней с необходимыми свойствами получают вакуумным напылением никеля и золота с последующим быстрым отжигом при температуре 450 °С в атмосфере водорода. Эта технология включает проведение ряда трудоёмких последовательных операций: изготовление фотошаблонов, фотолитография, травление меза-элементов, напыление металлов на два уровня, осуществление которых на тестовых образцах небольших размеров (краевые сегменты пластин) крайне затруднено. В настоящей работе проведено исследование возможности альтернативных способов создания низкоомных контактов к контактному слою QWIP GaAs/AlGaAs-структур.

Ключевые слова: QWIP-структура, микроконтакты, матрица, фотоприёмник, длинноволновый ИК-диапазон, гетероэпитаксиальные структуры, молекулярно-лучевая эпитаксия.

Ссылка: Трухачев А. В., Седнев М. В., Трухачева Н. С. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 55.

Reference: A. V. Trukhachev, M. V. Sednev, and N. S. Trukhacheva, Prikl. Fiz., No. 5, 55 (2018).

Введение

Одним из наиболее перспективных методов регистрации инфракрасного излучения в настоящее время является ИК-детектирование на основе гетероэпитаксиальных структур с множественными квантовыми ямами (КЯ) или Quantum Well Infrared Photodetector, т. е. инфракрасный приёмник на квантовых ямах, сокращённо QWIP.

Наибольшее распространение получили квантово-размерные гетероэпитаксиальные структуры на основе соединений группы A_3B_5 . В частности, наибольшую перспективу для применения в технологии создания фотоприёмных устройств на основе QWIP-структур имеют твердые растворы на основе арсенида галлия. Перспективность таких гетероэпитаксиальных структур заключается в высоком уровне развития технологии выращивания эпитаксиальных слоёв GaAs различными эпитаксиальными мето-

дами (молекулярно-лучевая и жидкофазная эпитаксии), а также в возможности высокого уровня интеграции фотоприёмных элементов и электронных элементов обработки сигналов [1–4].

Развитие технологии производства матричных фотоприёмников на основе QWIP GaAs/AlGaAs-структур показало, что эти структуры обладают высокой технологичностью, воспроизводимостью и, что особенно важно, однородностью параметров по элементам в матрицах формата 256×256, 640×512 и др. QWIP-фотоприёмники работают в дальнем ИК-диапазоне и имеют чувствительность от 7,5 до 9 мкм. Приборы на квантовых ямах обладают высокой пороговой чувствительностью. Так, у лучших приборов эквивалентная шуму разность температур NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) даже ниже 10 мК, у типовых – 20 мК. При этом указанные приборы обладают сравнительно узкой полосой спектральной чувствительности и возможностью её подстройки в широком диапазоне [4–8].

Использование фотоприёмников на основе QWIP-структур позволяет создавать крупноформатные матричные фотоприёмные устройства (МФПУ). Матрицы на квантовых ямах (QWIP-матрицы) составляют серьёзную конкуренцию фотоприёмникам, выполненным на основе теллурида кадмия ртути (КРТ) в диапазоне 8–12 мкм [9–12].

Трухачев Антон Владимирович, инженер-технолог 2 кат.

Седнев Михаил Васильевич, нач. участка, к.т.н.

Трухачева Наталия Сергеевна, инженер-технолог 2 кат.

АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 31 октября 2018 г.

Существенным недостатком QWIP GaAs/AlGaAs-приемников является низкий коэффициент преобразования излучения (~2 %), что обусловлено малым значением коэффициента собственного поглощения, и они требуют более глубокого охлаждения, чем приемники на КРТ (HgCdTe) [7, 9, 14].

Одной из проблем при производстве QWIP-приёмника является изготовление низкоомных контактов к выращенным контактными слоям из широкозонного материала GaAs.

В технологии изготовления фоточувствительных элементов металлические контакты к контактному слою GaAs нижнего и верхнего уровней с необходимыми свойствами получают вакуумным напылением никеля и золота с последующим быстрым отжигом при температуре 450 °С в атмосфере водорода [1–4]. Эта технология включает проведение ряда трудоемких последовательных операций: изготовление фотошаблонов, фотолитография, травление мезаэлементов,

напыление металлов на два уровня, осуществление которых на тестовых образцах небольших размеров (краевые сегменты пластин) крайне затруднено.

Целью данной работы является исследование возможности альтернативных способов создания низкоомных контактов к контактными слоям QWIP GaAs/AlGaAs-структур.

Параметры пластин с ГЭС и подготовка образцов

В работе использованы выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии эпитаксиальные QWIP GaAs/AlGaAs-структуры, основные параметры функциональных слоев которых представлены в табл. 1.

Образцы небольших размеров изготавливали скрайбированием краевых сегментов QWIP GaAs/AlGaAs-структур, выращенных на подложках с диаметром 51,8 мм из полуизолирующего GaAs.

Таблица 1

Параметры функциональных слоев ГЭС структуры

Архитектура ГЭС структуры		Толщина слоя, нм	Концентрация примеси, см ⁻³
Полуизолирующая подложка GaAs		4×10 ⁵	
Буферный слой GaAs		200	
Нижний контактный слой n ⁺ -GaAs (GaAs:Si)		1200	1e+18
Барьерный слой Al _{0,27} Ga _{0,73} As		52	
Квантовая яма GaAs:Si	×50	4,6	3e+17
Барьерный слой Al _{0,27} Ga _{0,73} As	×50	52	
Верхний контактный слой n ⁺ -GaAs (GaAs:Si)		800	1e+18

Травление до нижнего контактного слоя выполняли жидкостным травлением маскированных фоторезистом участков поверхности образцов. Измерение глубины травления осуществляли на контактном профилометре, обеспечивающим погрешность не более 2 нм.

Металлические контакты получали облуживанием индием поверхности контактных слоев с помощью микропаяльника и последующим быстрым отжигом при температуре 450 °С в атмосфере водорода.

На рис. 1 представлено схематичное изображение тестовых образцов небольших размеров на основе QWIP GaAs/AlGaAs-структур с металлическими контактами.

Сопротивление контактов оценивали по ВАХ, измеренным между металлическими контактами, сформированными на поверхности контактных слоев из сильно легированного арсенида галлия. Измерение ВАХ выполняли по методике, описанной в работе [13].



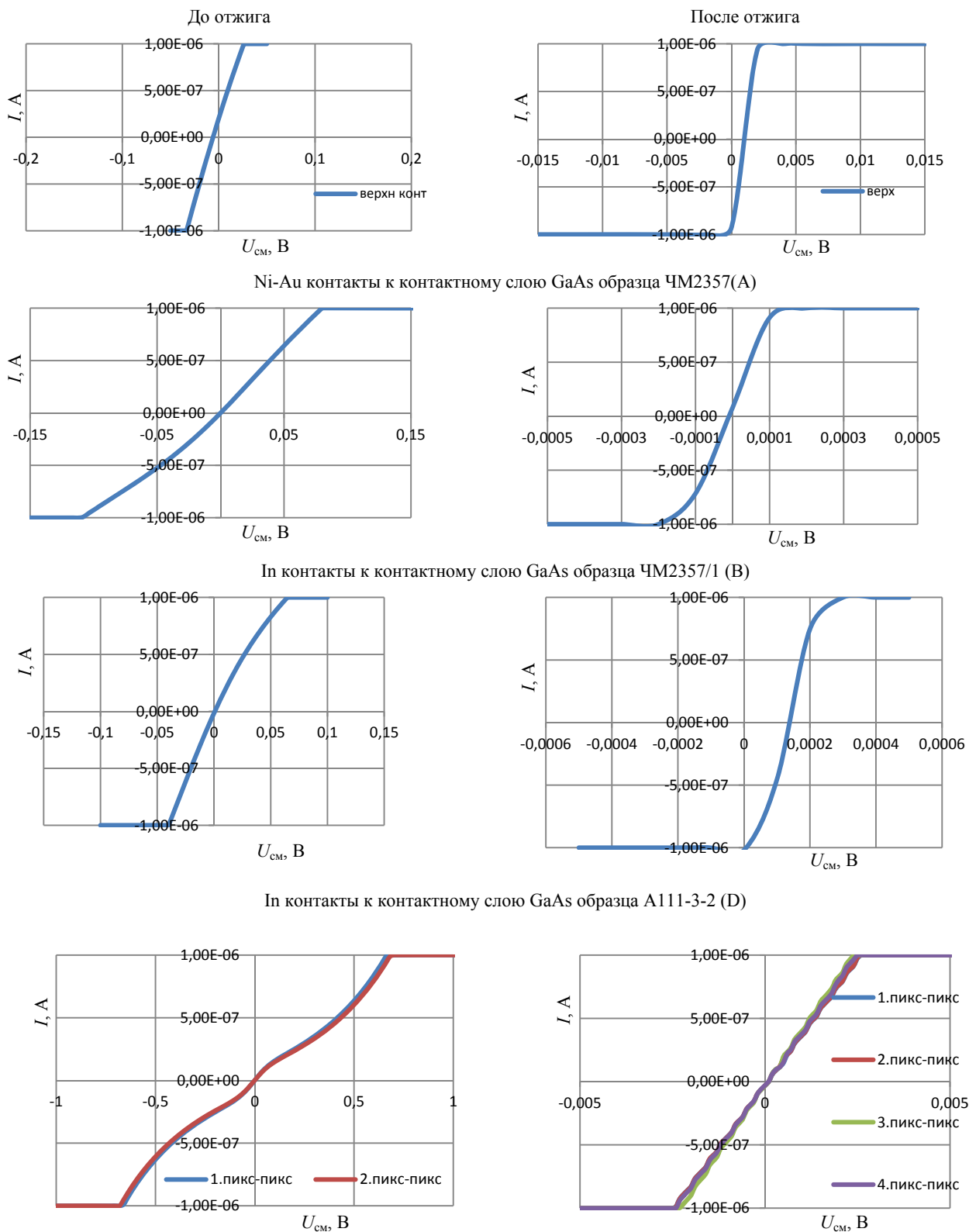
Рис. 1. Схематичное изображение тестовых образцов небольших размеров на основе QWIP GaAs/AlGaAs-структур с металлическими контактами.

Результаты и обсуждение

Из структур с типичными параметрами, представленными выше в табл. 1, были подготовлены три образца (А, В и D). На первом образце (А) были сформированы контакты вакуумным напылением Ni-Au к верхнему и нижнему кон-

тактному слою QWIP-структуры. У второго (B) и третьего (D) образцов контакты были сформированы к верхнему и нижнему контактному слою нанесения индия с помощью микропаяльника.

Вольт-амперные характеристики между контактами этих образцов QWIP-структур и в матрице ФЧЭ формата 384×288 с шагом 25 мкм (между соседними элементами), измеренные при температуре 300 °С до и после отжига, представлены на рис. 2.



Ni-Au контакты к контактному слою GaAs в матрице ФЧЭ M2357 388×288 с шагом 25 мкм (между соседними элементами) (C)

Рис. 2. ВАХ между контактами до и после отжига, измеренные при температуре 300 °С.

Как видно из рисунка, изменение тока с увеличением напряжения смещения аппроксимируется линейной функцией, что позволяет оценить сопротивление контактов, если сопротивление

объема полупроводникового материала, соединяющего их, значительно меньше. Значения сопротивлений исследованных образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения сопротивлений, полученных из измерений ВАХ между контактами, исследованных образцов

№ образца	Сопротивление между контактами, Ом							
	До отжига				После отжига			
	A Ni-Au	C Ni-Au	B In	D In	A Ni-Au	C Ni-Au	B In	D In
Верхнего контактного слоя	$1,8 \times 10^4$		4×10^4	-	1×10^3		3×10^2	-
Верхнего и нижнего контактного слоя			-	6×10^4			-	$2,6 \times 10^2$
Соседними элементами матрицы		8×10^5				$2,5 \times 10^3$		

Как видно из табл. 2, сопротивления между контактами после отжига уменьшаются на два порядка, что можно объяснить разрушением барьера на границе металл-полупроводник и соответствующим падением контактного сопротивления, поскольку значительное увеличение электропроводности сильнолегированного материала арсенида галлия при кратковременном нагревании до 450 °С маловероятно. Значительное различие в сопротивлениях контактов, изготовленных на разных образцах, соответствовало неодинаковой площади контактов. Этот факт дает еще одно подтверждение того, что наблюдаемое уменьшение сопротивления между контактами обусловлено формированием омических контактов на границе с полупроводником.

Заключение

Экспериментально показана возможность использования индия для формирования низкоомных микроконтактов к контактными слоям арсенида галлия гетероэпитаксиальных QWIP-структур на тестовых образцах небольших размеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aspnes D. E., Kelso S. M., Logan R. A., Bhat R. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. No. 2. P. 754.
2. Kan Y., Nagai H., Yamanishi M., Suemune I. // IEEE J. Quantum Electronics. 1987. Vol. QE-23. No. 12. P. 2167.
3. Бурлаков И. Д., Дирочка А. И., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 509.

4. Gonzalez-Cuevas J. A., Refaat T. F., Abedin M. N., Elsayed-Ali H. E. // J. Appl. Phys. 2007. No. 102. P. 014504-1.
5. Choi K. K., Jhabvala M. D., Forrai D. P., Waczynski A., Sun J., Jones R. // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 8012. P. 80120R-1.
6. Никонов А. В., Скробнева П. С., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 31.
7. Дудин А. Л., Касаев Н. И., Красовицкий Д. М., Кокин С. В., Чалый В. П., Шуков И. В. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 49.
8. Gulyaev D. V., Zhuravlev K. S., Bakarov A. K., Toropov A. I. // Semiconductors. 2015. No. 2. P. 224.
9. Cocle Olivier, Rannou Christophe, Forestier Bertrand, Bois Paul, Jouglu Philippe F., Costard Eric M., Manissadjian A., Gohier D. QWIP compact thermal imager: CATHERINE-XP and its evolutions. – SPIE Defense & Security [6542-127]. ORLANDO 2007.
10. Ушакова М. Б. Тепловизоры на основе неохлаждаемых микроболометрических матриц: современное состояние зарубежного рынка и перспективы развития. – М: ОНТИ ГУП «НПО «Орион», 2001.
11. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004.
12. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник для вузов. – М.: Логос, 2004.
13. Седнев М. В., Болтарь К. О., Иродов Н. А., Демидов С. С. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 84.
14. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Власов П. В., Лопухин А. А., Чалый В. П., Кацаев Н. И. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 37.
15. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. – М.: Изд-во «Мир», 1985.
16. Шалимова К. В. Физика полупроводников. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
17. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. – Краснодар: Изд-во Лань, 2009.
18. Концевой Ю. А., Кудин В. Д. Методы контроля технологии производства полупроводниковых приборов. – М.: Изд-во «Энергия», 1973.

The use of indium for the formation of low-resistance microcontacts to the contact layers of gallium arsenide heteroepitaxial QWIP structures

A. V. Trukhachev, M. V. Sednev, and N. S. Trukhacheva

Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received October 31, 2018

Consideration is given to the possibility of using indium in low-resistance contacts building on heteroepitaxial QWIP-structures for IR focal plane arrays detectors. The prevalent technology for forming contacts uses vacuum evaporating of Ni-Au with subsequent annealing at 450 °C in H₂ ambience. It includes a row of difficult operations, namely, preparation of photo masks, photolithography, etching mesa elements, metal deposition on two levels, which are difficult to attain in such small test samples. This paper presents an investigation of alternative methods to form the low-resistance contacts to contact layers of the QWIP GaAs/AlGaAs structures.

Keywords: QWIP-structure, microcontacts, focal plane array, detector, long-wave infrared range, hetero-structure, molecular beam epitaxy.

REFERENCES

1. D. E. Aspnes, S. M. Kelso, R. A. Logan, and R. Bhat, *J. Appl. Phys.* **60** (2), 754 (1986).
2. Y. Kan, H. Nagai, M. Yamanishi, and I. Suemune, *IEEE Journal of quantum electronics* **QE-23** (12), 2167 (1987).
3. I. D. Burlakov, A. I. Dirochka, M. D. Korneeva, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (5), 509 (2014).
4. J. A. Gonzalez-Cuevas, T. F. Refaat, M. N. Abedin, and H. E. Elsayed-Ali, *J. Appl. Phys.*, No. 102, 014504-1 (2007).
5. K. K. Choi, M. D. Jhabvala, D. P. Forrai, A. Waczynski, J. Sun, and R. Jones, *Proc. of SPIE* **8012**, 80120R-1 (2011).
6. A. V. Nikonov, P. S. Skrebneva, and N. I. Iakovleva, *Prikl. Fiz.* No. 1, 31 (2017).
7. S. V. Kokin, V. P. Chaliy, I. V. Shucov, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 49 (2016).
8. D. V. Gulyaev, K. S. Zhuravlev, A. K. Bakarov, and A. I. Toropov, *Semiconductors*, No. 2, 224 (2015).
9. Olivier Cocle, Christophe Rannou, Bertrand Forestier, Paul Jouglu Philippe F. Bois, Eric M. Costard, A. Manissadjian, and D. Gohier, *Qwip compact thermal imager: CATHERINE-XP and its evolutions*. (SPIE Defense & Security. ORLANDO, 2007).
10. M. B. Ushakova, *Imagers based on uncooled microbolometer focal plane arrays: state of the art and prospects* (Orion R&P Association, Moscow, 2001) [in Russian].
11. V. V. Tarasov and Y. G. Yakushenkov, *Infrared imaging systems* (Logos, Moscow, 2004) [in Russian].
12. Y. G. Yakushenkov, *Electro-optical devices: Theory and design* (Logos, Moscow, 2004) [in Russian].
13. M. V. Sednev, K. O. Boltar, N. A. Irodov, and S. S. Demidov *Prikl. Fiz.* No. 3, 84 (2015).
14. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, P. V. Vlasov, A. A. Lopuhin, V. P. Chaliy, and N. I. Kacavec, *Prikl. Fiz.* No. 6, 37 (2016).
15. I. Brodie and J. Muray, *The physics of microfabrication* (Mir, Moscow, 1985) [in Russian].
16. K. V. Shalimova, *Physics of semiconductors* (Energoatomizdat, Moscow, 1985) [in Russian].
17. L. A. Koledov, *Technology and design of chips, microprocessors and microtextbook* (Lan, Krasnodar, 2009) [in Russian].
18. U. A. Koncevoi and V. D. Kudin *Methods of control fabrication technology of semiconductors devices* (Energiya, Moscow, 1973) [in Russian].