

УДК 621.315.5:621.383

Исследование омического контакта AuGe/n⁺-GaP

А. К. Будтолаев, Л. А. Косухина, П. Е. Хакуашев, И. В. Чинарёва

Исследование направлено на минимизацию удельного сопротивления омического контакта AuGe на поверхности GaP для использования в технологии фотодиодов Шоттки. Методом длинной линии (TLM) определялось удельное сопротивление контакта AuGe в зависимости от температуры отжига. Минимальное $\rho_c = 4,01 \times 10^{-3}$ Ом·см² было получено быстрым термическим отжигом. Исследования вольт-амперных характеристик фотодиодов Шоттки подтвердили возможность использования этого контактного покрытия в технологии производства фотодиодов.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: омический контакт, удельное сопротивление, фотодиод, барьер Шоттки, AuGe, GaP.

Введение

Известно, что при создании полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС) особое место занимает технология формирования омических контактов. Это связано с существенным влиянием их свойств на параметры приборов и ИС. Симметричность и линейность вольт-амперных характеристик (ВАХ) при отсутствии инжекции и минимальном удельном контактном сопротивлении ρ_c обуславливают нормальное функционирование фотодиодов. При этом следует учитывать, что фосфид галлия GaP широко используется в фотоприемниках УФ-излучения [1—3].

Особенностью фотодиодов с барьером Шоттки, разработанных в «НПО «Орион», является малая площадь кристалла ($0,9 \times 0,45$ мм²) и, соответственно, малая площадь омического контакта.

Как известно, многие полупроводники из группы A^{III}B^{IV} (GaAs, InP, GaP) на свободной поверхности имеют высокую концентрацию поверхностных состояний, энергетически расположенных в глубине запрещенной зоны, что приводит к жесткому закреплению уровня Ферми на поверхности [4]. Поэтому для образования омического контакта к таким полупроводникам необходимо:

1. понизить плотность поверхностных состояний;
2. уменьшить высоту потенциального барьера за счет изменения химического состава приконтактной области;
3. увеличить концентрацию носителей заряда в приконтактной области.

Омические контакты к GaP исследовались во многих работах [5—15]. Было установлено, что омические контакты в основном формируются за счет межфазных взаимодействий на границе раздела металл—GaP. При этом возможны как твердофазная реакция, так и сплавление с формированием металлических шунтов. В зависимости от уровня легирования n-GaP, а также от условий формирования омических контактов и типа металлизации, величина удельного контактного сопротивления может изменяться в широких пределах, что иллюстрируют данные на рис. 1, взятые из работы [16].

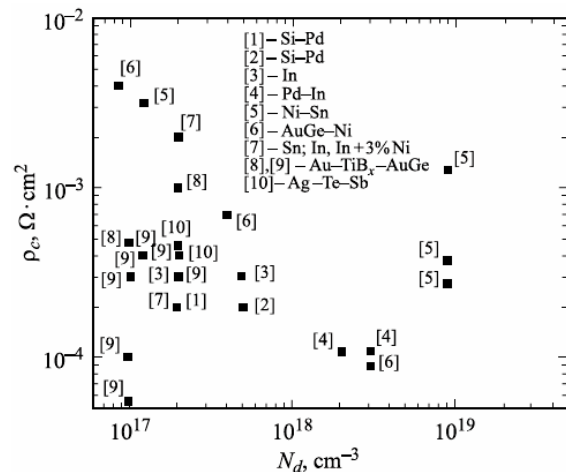


Рис. 1. Величины удельного контактного сопротивления при разных уровнях легирования для ряда материалов

Будтолаев Андрей Константинович, вед. инженер-технолог.
Косухина Лариса Альбертовна, вед. инженер-технолог.
Хакуашев Павел Евгеньевич, зам. начальника ПТК.
Чинарёва Инна Викторовна, вед. инженер-технолог.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. 8 (499) 374 94-00. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 8 июня 2015 г.

© Будтолаев А. К., Косухина Л. А., Хакуашев П. Е., Чинарёва И. В., 2015

Заметим, что сплав AuGe (12 % Ge) или послойное напыление Au и Ge часто используются для создания омического контакта с низким удельным сопротивлением как для GaP [17], так и для GaAs [18] и InP [19, 20].

Целью данной работы являлось поиск путей дальнейшей минимизации удельного контактного сопротивления омического контакта AuGe на поверхности GaP для использования в технологии фотодиодов с барьером Шоттки.

Постановка экспериментов

Эксперименты проводились на полированных пластинах монокристаллического GaP *n*-типа проводимости, легированных кремнием с концентрацией примеси $N = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и выращенных методом Чохральского. При этом плоскость ориентации пластин — (100). Толщина пластин — 500 мкм.

Формирование контактных площадок толщиной 1000 Å на пластинах осуществлялось методом металлизации в вакууме $1 \cdot 10^{-6}$ Торр, а именно резистивным напылением из эвтектического сплава AuGe (12 % Ge) на поверхность полупроводника, предварительно обработанного в растворе HF:H₂O = 1:10 и промытого в деионизованной воде для удаления собственного окисла.

Измерения проводились на специально изготовленных тестовых образцах после быстрого термического отжига (БТО) в атмосфере H₂ при температурах $T = 550, 600, 650 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 секунд. Контактные площадки выделялись методом прямого травления с помощью стандартной фотолитографии с маской фоторезиста.

Экспериментальные исследования

Контроль вольт-амперных характеристик контактов и измерение общего сопротивления R_T осуществлялся до и после термообработки с помощью анализатора параметров полупроводников 4145B Hewlett Packard и зондовой установки Karl Zeiss PSM6.

Определение удельного контактного сопротивления ρ_c проводилось методом длинной линии, детальное описание которого приведено в [21, 22].

Использованная тест-структура показана на рис. 2. Сопротивление между двумя металлическими контактными площадками складывается из сопротивления двух контактов R_c и сопротивления объема полупроводника между ними R_s .

На рис. 3 представлена схема измерения (метод длинной линии) с распределенными параметрами (TLM-метод). Образец состоит из одинаковых прямоугольных контактных площадок, расположенных на разных расстояниях друг от друга (от 10 до 550 мкм).

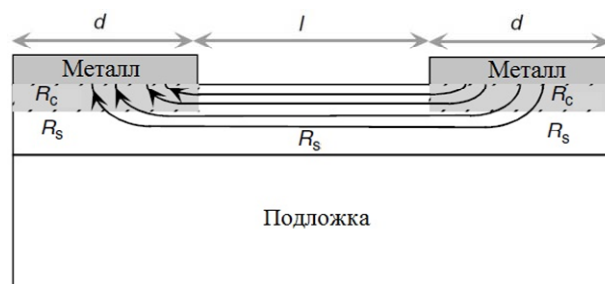


Рис. 2. Использованная тест-структура

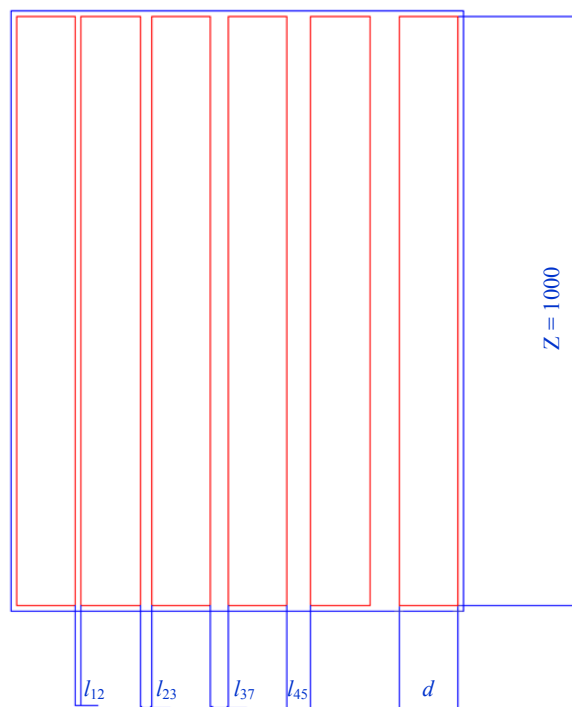


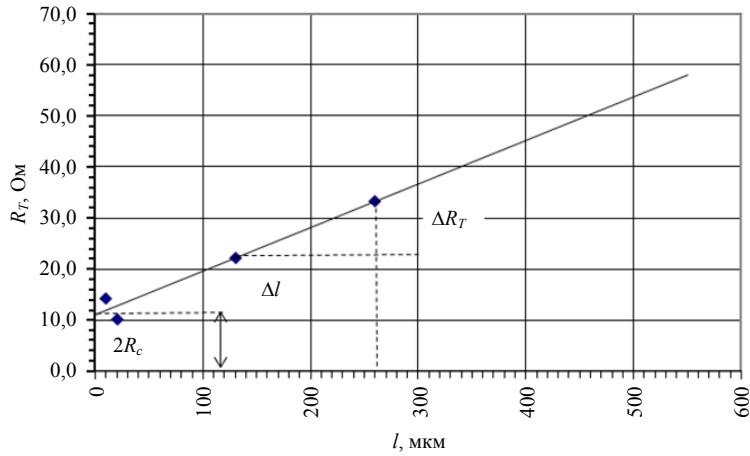
Рис. 3. Схема измерения методом длинной линии с распределенными параметрами (TLM-метод)

На рис. 4 показана зависимость измеренного сопротивления от расстояния между площадками для контактов AuGe-*n*⁺-GaP после БТО при $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 с. Эта зависимость может быть аппроксимирована линией $R_T = 0,0854 \times l + 11,038$, где размерность R_T — Ом, а расстояния l — мкм. Общее сопротивление R_T , поверхностное сопротивление пленки металла R_s и удельное контактное сопротивление ρ_c определяются из следующих выражений:

$$R_T = 2R_c + R_s \left(\frac{L}{Z} \right) \quad (1)$$

$$\rho_c = \left[\frac{R_c^2 \times Z^2}{R_s} \right] \quad (2)$$

где R_c — сопротивление контакта; R_s — сопротивление объема полупроводника; L — расстояние между площадками; Z — ширина площадки.



$$R_T = 0,0854 l + 11,038$$

$$R^2 = 0,9604$$

$$R_T = 2R_c + R_s(l/Z)$$

$$R_c = 11,038/2$$

при $(l = 0) R_T = 2R_c$

$$R_s = Z * \Delta R_T / \Delta l$$

$$\text{tg}\alpha = R_s / Z \rho_c = R_c^2 * Z^2 / R_s$$

Рис. 4. Зависимость измеренного сопротивления от расстояния между площадками для контактов AuGe-n⁺-GaP после БТО при T = 600 °C в течение 60 с

ТЛМ-метод может использоваться для определения удельного контактного сопротивления величиной не менее 10⁻⁷ Ом·см².

На рис. 5 показана вольт-амперная характеристика контакта AuGe/n⁺-GaP после напыления (а) и после БТО (б). Непосредственно после напыления ВАХ контактов были нелинейными даже при напряжениях менее ±1 В (б). После БТО ВАХ кон-

тактов оказались симметричными и линейными в диапазоне напряжений значительно превышающем ±1В (а).

По результатам измерения, используя формулы (1) и (2), были определены удельные контактные сопротивления для трех температур, которые представлены в таблице.

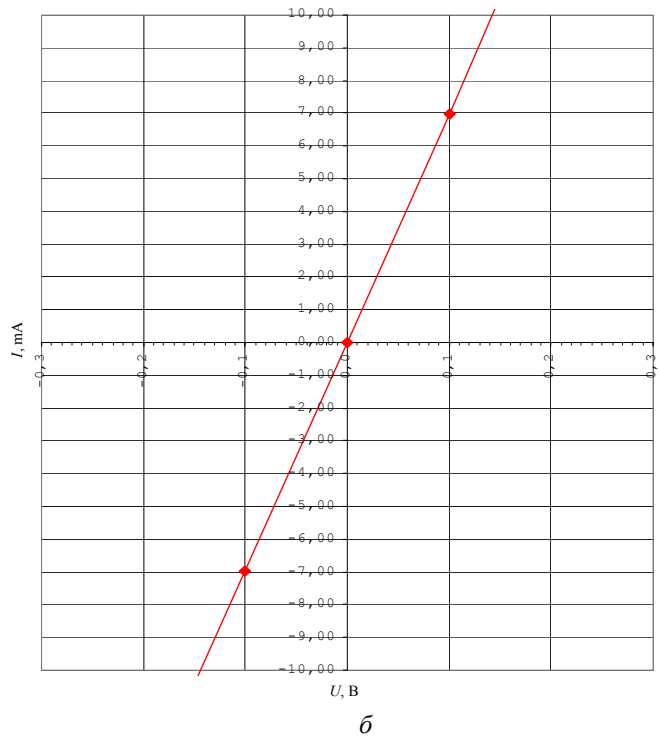
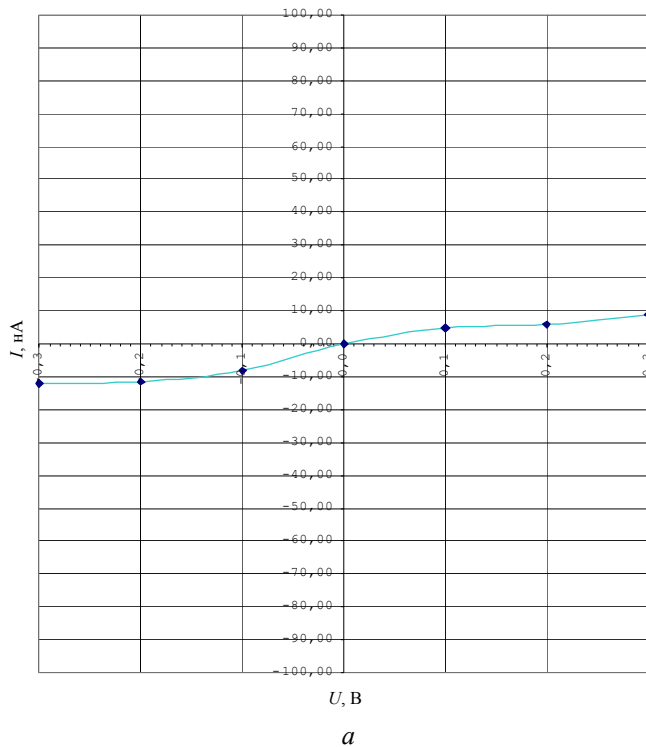


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика контакта AuGe-n⁺-GaP после напыления (а) и после БТО (б)

Таблица

T, °C	550	600	650
R _c , Ом	5,39	5,52	5,26
R _s , Ом	3,92	76,00	6,41
ρ _c , Ом·см ²	7,39E-02	4,01E-03	4,32E-02

Зависимость удельного сопротивления контакта $\text{AuGe}/n^+\text{-GaP}$ от температуры отжига представлена на рис. 6.

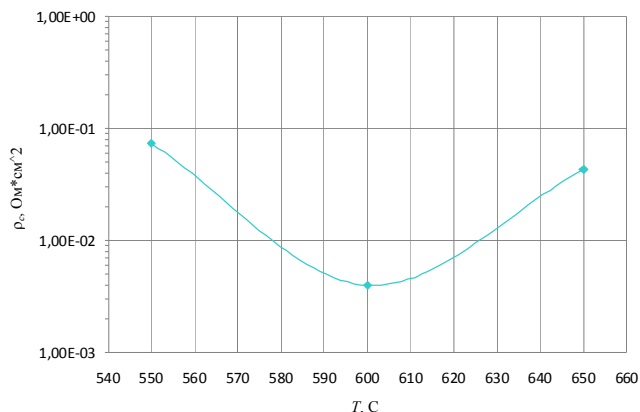


Рис. 6. Зависимость удельного сопротивления контакта $\text{AuGe}-n^+\text{-GaP}$ от температуры отжига

Из графика на рис. 6 следует, что имеется диапазон температур, в котором достигается наименьшее значение $\rho_c = 4 \cdot 10^{-3}$ Ом·см². Этот минимум говорит об окончании процесса формирования омического контакта. Аналогичная зависимость наблюдалась для контактов AuGeNi к GaAs [6], $\text{Au-TiBx-AuGe-n-GaP}$ [14], $\text{Au-TiBx-AuGe-n-InP}$ [16], Ni/Au/Ge/Au/Ni/Au [17].

После исследования распределения элементов контакта по глубине методом Оже-спектроскопии, фазового состава контактной металлизации с помощью рентгеновской дифрактометрии и металлографических исследований на электронном микроскопе, авторы этих работ связывали наблюдаемые изменения сопротивления контакта со сложными перераспределениями элементов, диффузией Au и Ge в GaP с образованием твердых растворов и соединений.

С материаловедческой точки зрения, наличие минимума означает, что все атомы германия заняли соответствующие узлы в решетке фосфида галлия и создали электрически активные электронно-дырочные центры. Согласно классификации, предложенной в [23], для этого участка зависимости подходит модель омического контакта вида $\text{Me}/n^+\text{-GaP}$, где n^+ — легированный германием промежуточный слой между полупроводником и материалом омических контактов, который и определяет величину удельного контактного сопротивления.

Участок с уменьшением ρ_c соответствует модели омического контакта вида $\text{Me}/d/\text{GaP}$, где d — сложный по составу окисный промежуточный слой между полупроводником и материалом омических контактов.

Участок, характеризующийся ростом контактного сопротивления, обусловлен диффузией остальной части атомов золота, галлия и фосфора к границе контакт—полупроводник и образованием интерметаллических соединений типа AuGa и др., обладающих высоким сопротивлением. Модель омического контакта в этом случае представляется в виде структуры $\text{Me}/n^+\text{-v-GaP}$, где v — высокоомный слой.

Нужно отметить, что во всех случаях после БТО наблюдался разброс значений ρ_c на полпорядка. Это, видимо, указывает на наличие неоднородного проводящего слоя, формирующего контакт к $n\text{-GaP}$.

Изготовление фотодиодов с барьером Шоттки

Для определения влияния сопротивления омического контакта на вольт-амперные характеристики фотодиодов с барьером Шоттки были изготовлены две партии фотодиодов:

а) по стандартной технологии с омическим контактом Ti/Au , отожженном в кварцевой трубе накатной водородной печи при $T = 400$ °C в течение 20 минут;

б) по новой технологии с омическим контактом AuGe , подвергнутом БТО при $T = 600$ °C в течение 60 секунд в атмосфере H_2 .

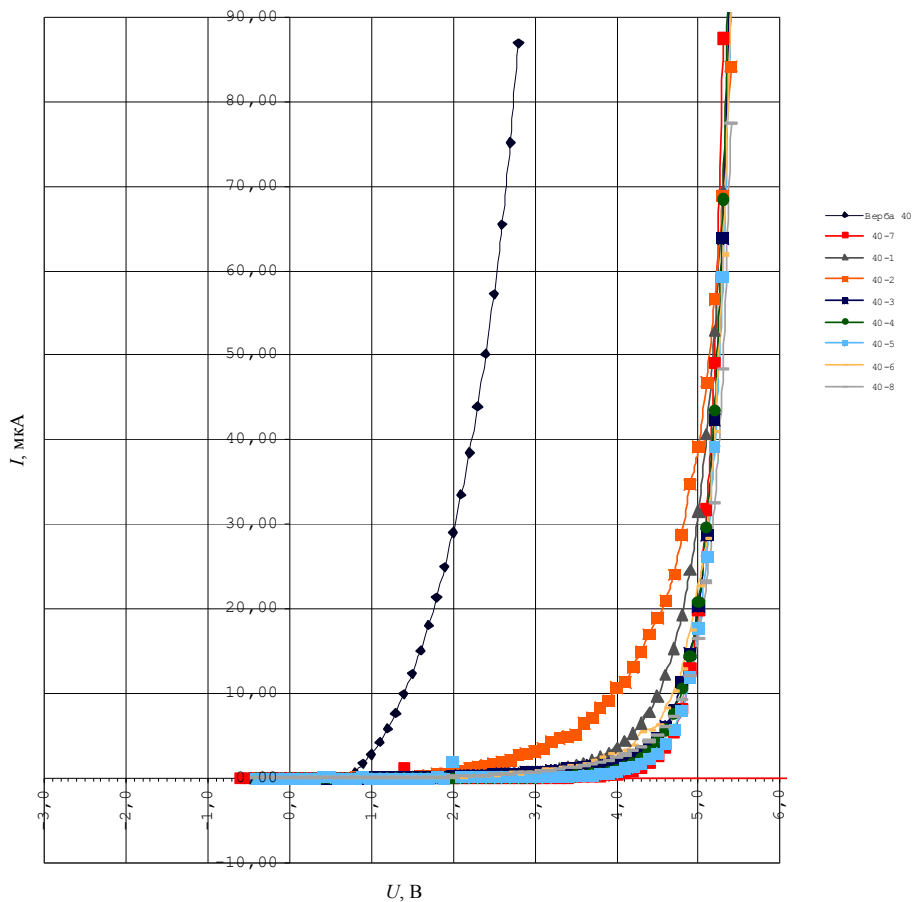
В качестве полупроводникового материала для их изготовления использовались гомоэпитаксиальные структуры $n\text{-GaP-n}^+\text{-GaP}$, выращенные на подложках, идентичных вышеописанным.

Готовые пластины площадью ~ 10 см² разделялись на кристаллы с площадью 0,004274 см². Измерению подвергались как фотодиоды на пластине, так и фотодиоды на восьми отдельных кристаллах.

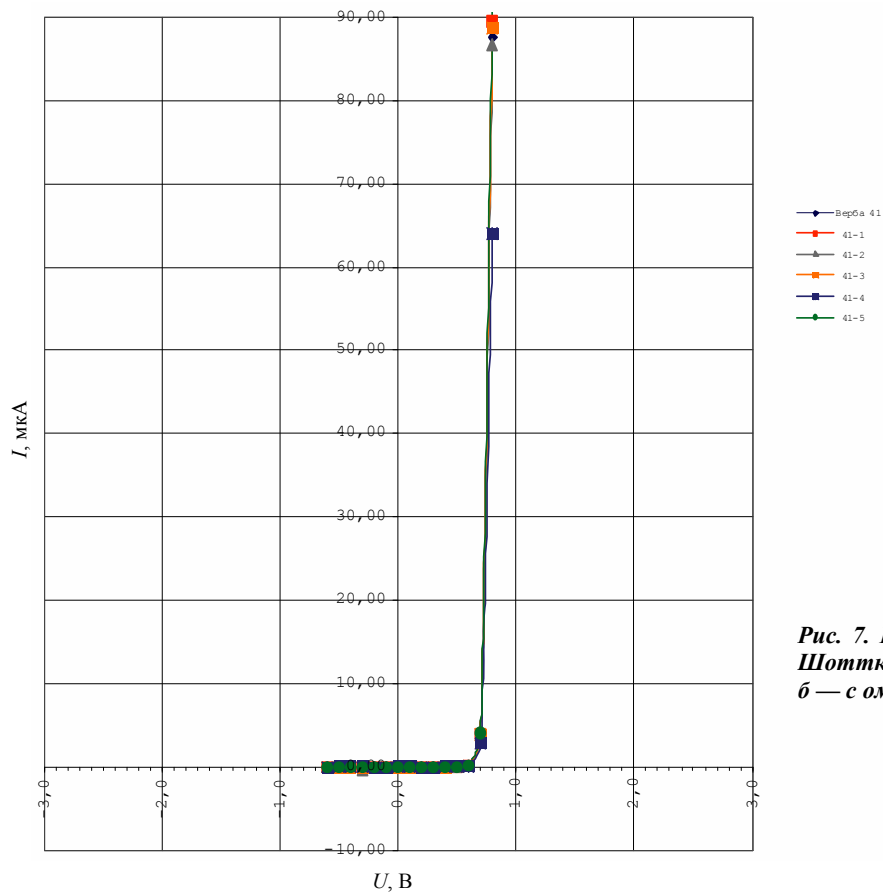
ВАХ фотодиодов до и после резки показаны на рис. 7.

Как видно из рис. 7, б, форма ВАХ фотодиода с омическим контактом AuGe не зависела от площади омического контакта и не имела различий от кристалла к кристаллу. Независимость формы ВАХ от площади омического контакта свидетельствует о достаточно малом его сопротивлении. Этим и подтверждается, что контакт $\text{AuGe-n}^+\text{-GaP}$ может быть использован в качестве омического для фотодиодов с барьером Шоттки малой площади.

Заметим, что в случае, отраженном на рис. 7, а, контакт $\text{Ti}/\text{Au-n}^+\text{-GaP}$ также является омическим, но его сопротивление недостаточно мало.



а



б

Рис. 7. Вольт-амперные характеристики диодов Шоттки: а — с омическим контактом Ti/Au; б — с омическим контактом AuGe

Заключение

В работе проведено исследование путей минимизации удельного сопротивления омического контакта AuGe на поверхности GaP для использования в технологии фотодиодов Шоттки. Минимальное удельное контактное сопротивление $\rho_c = 4,01 \cdot 10^{-3}$ Ом·см², измеренное методом длинной линии, было получено для быстрого термического отжига в атмосфере водорода при температуре 600 °С в течение 60 секунд. По аналогии с контактами на GaAs, высказано предположение, что зависимость ρ_c от температуры определяется сложными процессами перераспределения элементов, в т. ч. диффузией Au и Ge в GaP с образованием твердых растворов и соединений.

Исследования вольт-амперных характеристик фотодиодов с барьером Шоттки подтвердили возможность использования указанного контактного покрытия и режимов его создания для фотодиодов с барьером Шоттки на основе GaP с малой площадью омического контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимова И. Д., Стафеев В. И. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 41.
2. Рудневский В. С., Стафеев В. И. // Прикладная физика. 2004. № 1. С. 79.
3. Варганова В. С., Кравченко Н. В., Патрин В. М. и др. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 80.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — Пер. с англ. под ред. Р. А. Сурица. — М.: Мир, 1984.
5. Park M. H., Wang L. S., Dufner D. C., et al. // J. Appl. Phys. 1997. V. 81. No. 7. P. 3138.
6. Wang L. S., Park M. H., Jordge H. A., et al. // Electron. Lett. 1996. V. 82. No. 4. P. 409.

7. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А., Константинов О. В. и др. // Письма ЖТФ. 2004. Т. 30. № 19. С. 17.
8. Lin C. F., Ingerly D. B., Chang Y. A. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 3543.
9. Васильев И. Г., Боев Г. Г., Курасов В. Н. и др. // Электрон. техника. сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1970. № 3. С. 65.
10. Shin K. K., Blum J. M. // Sol. St. Electron. 1972. V. 15. P. 1177.
11. Игнаткина Р. С., Кривошеева Р. Н., Мескин С. С. и др. // ПТЭ. 1968. № 5. С. 215.
12. Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Иванов В. Н. и др. / Тр. XVII Межд. совещ. «Радиационная физика твёрдого тела», Севастополь, Украина, 2008 (М., МГИЭМ, 2008). С. 194.
13. Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Иванов В. Н. и др. / Тр. Межд. конф. «Научно-технический прогресс и современная авиация» (Баку, Азербайджан, 2009). С. 283.
14. Nakatsuka H., Domenico A. J., Pearson G. L. // Sol. St. Electron. 1971. V. 14. P. 849.
15. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 11. С. 1281.
16. Беляев Ф. У. и др. // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. Вып. 11. С. 1468.
17. Peternai L., et.al. / APCOM 2003, 9-th International Workshop on Applied Physics of Condensed Matter, June 11-13, 2003.
18. Дохтуров В. В. и др. // Вестник науки Сибири. 2012. Т. 31. № 2. С. 109.
19. Саченко А. В. и др. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 3. С. 348.
20. Clausen T. et. al. // Microelectronic Engineering. 1991. V. 15. P. 157.
21. Berger H. H. // Sol.-St. Electron. 1972. V. 15. No. 145. P. 541.
22. Morkoc H. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. V. 2: Electronic and Optical Processes in Nitrides. — Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2008. .
23. Стриха В., Бузанова Б. Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике. — М.: Радио и связь, 1987.

Researches of the Ohm contact for AuGe/n⁺-GaP

A. K. Budtolaev, L. A. Kosukhina, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva

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

Received June 8, 2015

Consideration is given to minimization of specific resistivity of AuGe ohmic contact on the surface of GaAs for use in the Schottky photodiodes technique. The AuGe contact specific resistivity was measured by Transmission Line Method (TLM) depending upon the annealing temperature. The minimal $\rho_c = 4.01 \times 10^{-3}$ Ohm/cm was obtained in the course of a rapid annealing. Examining of Schottky photodiodes' current-voltage characteristics confirmed a possibility of use of such contact plating in the photodiodes production technique.

PACS: 85.60.-q

Keywords: ohmic contact, specific contact resistance, photodiode, Schottky barrier, AuGe, GaP.

REFERENCES

1. I. D. Anisimova and V. I. Stafeev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 41 (1999).
2. V. S. Rudnevsky and V. I. Stafeev, *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 79 (2004).
3. V. S. Varganova, N. V. Kravchenko, V. M. Patrin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 80 (2015).
4. M. Sze and K. Ng. Kwok, *Physics of Semiconductors Devices*. (Wiley, 2007).
5. M. H. Park, L. S. Wang, D. C. Dufner, et al., *J. Appl. Phys.* **81**, 3138 (1997).
6. L. S. Wang, M. H. Park, H. A. Jorjge, et al., *Electron. Lett.* **82**, 409 (1996).
7. T. V. Blank, Yu. A. Goldberg, O. V. Konstantinov, et al., *Tech. Phys. Lett.* **30** (19), 17 (2004).
8. C. F. Lin, D. B. Ingerly, and Y. A. Chang, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3543 (1996).
9. I. G. Vasil'ev, G. G. Boev, V. N. Kurasov, et al., *Elektron. Tekhn. Ser. 2. Poluprovodn. Prib.*, No. 3, 65 (1970).
10. K. K. Shin and J. M. Blum, *Sol. St. Electron.* **15**, 1177 (1972).
11. R. S. Ignatkina, R. N. Krivosheeva, S. S. Meskin, et al., *Instrum. Exp. Tech.*, No. 5, 215 (1968).
12. A. E. Belyaev, N. S. Boltovets, V. N. Ivanov, et al., in *Proc. XVII Intern. Conf. "Radiative Physics of Solids"* (Sevastopol, Ukraine, 2008). P. 194.
13. A. E. Belyaev, N. S. Boltovets, V. N. Ivanov, et al., in *Proc. Intern. Conf. "Scientific and Technical Progress and Modern Aviation"* (Baku, Azerbaijan, 2009). P. 283.
14. H. Nakatsuka, A. J. Domenico, and G. L. Pearson, *Sol. St. Electron.* **14**, 849 (1971).
15. T. V. Blank and Yu. A. Goldberg, *Semiconductors* **41**, 1281 (2007).
16. F. U. Belyaev et al., *Semiconductors* **43**, 1468 (2009).
17. L. Peternai, et al., in *Proc. APCOM 2003, 9-th International Workshop on Applied Physics of Condensed Matter* (June 11-13, 2003).
18. v. V. Dokhturov et al., *Vestn. Nauki Sibiri* **31** (2), 109 (2012).
19. A. V. Sachenko et al., *Semiconductors* **46**, 348 (2012).
20. T. Clausen et. al., *Microelectronic Engineering* **15**, 157 (1991).
21. H. H. Berger, *Sol.-St. Electron.* **15** (145), 541 (1972).
22. H. Morkoc, *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. V. 2: Electronic and Optical Processes in Nitrides*. (Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2008).
23. V. Strakha and B. Buzanova, *Physical Foundations of Reliability for Metal-Semiconductor Contacts* (Radio Svyaz', Moscow, 1987) [in Russian].