

УДК 621.372.544.2

Е.В. Ерофеев, А.И. Казимиров, С.В. Ишуткин, В.А. Кагадей

Омический контакт к n^+ -GaAs с торцевым диффузионным барьером

Представлен сравнительный анализ параметров несплавных Pd/Ge/Ta/Cu и сплавных Ge/Au/Ni/Ta/Au омических контактов к n^+ -GaAs, имеющих планарный, а также планарный и торцевой диффузионные барьеры на основе пленок Ta, формируемых методом магнетронного распыления. Установлено, что использование торцевого диффузионного барьера позволяет уменьшить величину приведенного контактного сопротивления омических контактов обоих типов, а также повысить термическую стабильность морфологии края контактной площадки в случае сплавных Ge/Au/Ni/Ta/Au омических контактов. Эффекты, наблюдаемые для образцов с торцевым диффузионным барьером, объяснены лимитированием диффузии, а также ограничением взаимодействия атомов Au или Cu с нижележащими слоями металлизации и с арсенидом галлия, происходящими по торцевой поверхности омического контакта.

Ключевые слова: n-GaAs, омический контакт, торцевой диффузионный барьер, медь, золото.

Частотные, шумовые, усилительные, надёжностные и другие характеристики GaAs-СВЧ-монолитных интегральных схем (СВЧ МИС) во многом определяются параметрами транзисторов и, в частности, сопротивлением и термостабильностью омических контактов к областям истока и стока, а также морфологией поверхности и края контактных площадок [1, 2]. Поэтому одним из путей улучшения характеристик транзисторов и МИС на их основе является улучшение комплекса параметров омических контактов. Задача получения улучшенных омических контактов становится всё более актуальной в связи с переходом к нанометровым размерам элементов транзисторов [3].

В технологии GaAs-СВЧ-МИС на основе НЕМТ в настоящее время широко используются омические контакты на основе многослойной композиции Ge/Au/Ni, получаемой осаждением в вакууме [4]. Данный контакт характеризуется низким значением приведенного контактного сопротивления, но имеет достаточно большую величину слоевого сопротивления.

Несплавной омический контакт на основе пленок Pd/Ge [5], формирующийся при термообработке за счет твердофазной диффузии атомов Ge в GaAs, имеет достаточно низкое приведенное контактное сопротивление, но также характеризуется высоким слоевым сопротивлением. По сравнению с Ge/Au/Ni омическим контактом он имеет лучшую термостабильность электрических параметров, а также более гладкую морфологию поверхности контактной площадки.

Для уменьшения слоевого сопротивления Ge/Au/Ni и Pd/Ge омических контактов на их поверхность дополнительно осаждается слой хорошо проводящего металла, в роли которого могут выступать пленки как Au, так и Cu [6–8]. При этом минимальное значение приведенного контактного сопротивления после температурной обработки может увеличиться за счёт проникновения Au или Cu в GaAs. Для ограничения диффузии Au и Cu в GaAs металлизацию контактов подвергают различным предварительным обработкам, либо вводят слой планарного диффузионного барьера, выполненного на основе пленок тугоплавких металлов или их соединений [9, 10]. При этом применение планарного барьера в составе металлизации омического контакта не исключает протекание диффузионных процессов по его торцам, в результате которых происходит взаимодействие верхних слоев металлизации с GaAs, ухудшающее приведенное контактное сопротивление и морфологию края контактной площадки [11, 12].

В работах [13, 14] впервые показано, что одновременное использование в составе Ge/Au/Ni/Ti/Au омического контакта Ti планарного и торцевого диффузионных барьеров, формируемых методом электронно-лучевого испарения в вакууме, позволяет уменьшить величину приведенного контактного сопротивления, а также увеличить термостабильность морфологии края контактной площадки.

Можно предположить, что применение планарного и торцевого диффузионного барьера в контакте Pd/Ge/Cu также должно улучшить его характеристики. При этом в качестве эффективного диффузионного барьера можно использовать пленку тугоплавких металлов (например, Ta) и их соединений (например, TaN), формируемую методом магнетронного распыления.

Целью данной работы является сравнительное исследование влияния Ta планарного, а также планарного и торцевого диффузионных барьеров, формируемых методом магнетронного распыления, на электрические и морфологические характеристики Pd/Ge/Ta/Cu несплавных и Ge/Au/Ni/Ta/Au сплавных омических контактов к n^+ -GaAs.

Методика эксперимента. Для проведения экспериментов использовались гетероструктуры GaAs/AlGaAs/InGaAs, полученные с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Формирование омических контактов осуществлялось к n^+ -слою GaAs с концентрацией электронов $n = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

На начальном этапе на пластине с помощью травления мезы производилось формирование изоляции. Далее на поверхности пластины формировалась двухслойная фоторезистивная маска, в которой вскрывались окна в месте будущих омических контактов. Перед напылением металлизации с целью удаления собственных оксидов GaAs образцы обрабатывались в водном растворе HCl (1:10) в течение 3 мин с последующей промывкой в деионизованной воде и сушкой в потоке азота. Далее пластина делилась на четыре части, из которых формировались четыре группы образцов. На поверхность образцов I и II групп методами электронно-лучевого испарения в вакууме при давлении остаточной атмосферы менее $7 \cdot 10^{-7}$ Торр производилось осаждение тонких пленок Pd, Ge и Ta, а на образцы III и IV групп производилось осаждение тонких пленок Ge, Au, Ni и Ta. Плёнка Ta служила планарным диффузионным барьером.

Затем на поверхность образцов из всех четырёх групп производилось дополнительное осаждение пленки Ta. На образцы групп I и III осаждение проводилось методом электронно-лучевого испарения, а на образцы групп II и IV – методом магнетронного распыления. Применение магнетронного распыления позволило сформировать на торцевой поверхности омического контакта тонкую пленку торцевого диффузионного барьера. При напылении плёнки Ta методом электронного лучевого испарения торцевой диффузионный барьер не формировался, а происходило только увеличение толщины планарного барьера.

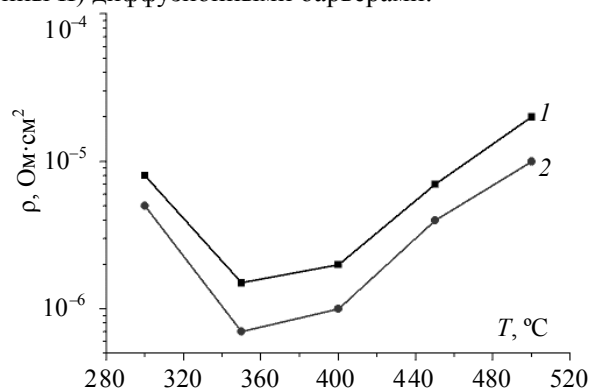
Процесс магнетронного распыления Ta мишени осуществлялся в DC-режиме. Плотность тока разряда составляла $j = 14 \text{ mA/cm}^2$, поток аргона равнялся $20 \text{ см}^3/\text{мин}$, а расстояние от мишени магнетрона до образцов составляло 30 см.

Далее методом электронно-лучевого испарения в вакууме при давлении остаточной атмосферы менее $7 \cdot 10^{-7}$ Торр производилось осаждение пленки Cu (образцы групп I, II) или плёнки Au (образцы групп III и IV). После удаления фоторезистивной маски для формирования омического контакта образцы всех групп делились на части и подвергались термообработке в диапазоне температур $T = 300\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Образцы исследовались методами оптической и сканирующей электронной микроскопии. Толщина металлизации омических контактов контролировалась методом профилометрии с точностью измерения, равной 0,1 нм. Приведенное контактное сопротивление ρ измерялось с помощью метода линий передач на десяти тестах и усреднялось [15]. Погрешность измерения не превышала 10–15%.

Результаты работы. На рис. 1 представлены зависимости приведённого контактного сопротивления Pd/Ge/Ta/Cu омических контактов, ρ от температуры отжига с планарным (образцы группы I), а также планарным и торцевым (образцы группы II) диффузионными барьерами.

Рис. 1. Зависимость приведенного контактного сопротивления ρ Pd/Ge/Ta/Cu омического контакта от температуры термообработки: 1 – образцы с Ta планарным диффузионным барьером; 2 – образцы с Ta планарным и торцевым диффузионными барьерами



Ход обеих зависимостей во всем диапазоне использованных температур отжига выглядит идентично, однако омические контакты с Ta планарным и торцевым диффузионными барьерами демонстрируют в 2 раза меньшую величину минимального значения приведенного контактного сопротивления.

На рис. 2 представлены зависимости приведённого контактного сопротивления, ρ сплавного Ge/Au/Ni/Ta/Au омического контакта от температуры отжига с планарным (образцы группы III), а также планарным и торцевым (образцы группы IV) диффузионными барьерами.

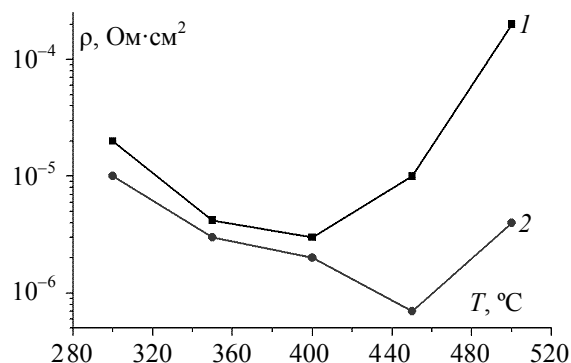


Рис. 2. Зависимость приведенного контактного сопротивления Ge/Au/Ni/Ta/Au омического контакта от температуры термообработки: 1 – образцы с Ta планарным диффузионным барьером; 2 – образцы с Ta планарным и торцевым диффузионными барьерами

Температурные зависимости на рис. 2 имеют вид кривых с минимумом, хорошо известный из литературы [11, 12]. С повышением температуры отжига усиливаются процессы взаимодиффузии между слоями металлизации и GaAs, что приводит к монотонному уменьшению приведённого контактного сопротивления, вплоть до достижения им минимального значения. Дальнейший рост температуры ведёт к увеличению сопротивления контакта, что связано с образованием высокоомных интерметаллических фаз. Минимальное значение приведённого контактного сопротивления, равное $\rho_{\text{MIN}} = 3 \cdot 10^{-6}$ Ом см² для Ge/Au/Ni/Ta/Au омического контакта без торцевого барьера, наблюдается при 400 °C (образцы группы III). Для омических контактов с планарным и торцевым диффузионными барьерами (образцы группы IV) минимальное значение контактного сопротивления достигается при более высоких температурах $T = 450$ °C и составляет $\rho_{\text{MIN}} = 7 \cdot 10^{-7}$ Ом·см².

Эффект уменьшения приведенного контактного сопротивления, наблюдаемый как для Pd/Ge/Ta/Cu, так и Ge/Au/Ni/Ta/Au омических контактов с торцевым барьером, по отношению к контактам без торцевого барьера хорошо коррелирует с результатами работ [13, 14], в которых применение планарного и торцевого диффузионного барьера на основе пленки Ti в составе сплавного Ge/Au/Ni/Ti/Au омического контакта к *n*-i-GaAs ($n = 2 \cdot 10^{17}$ м⁻³) привело к уменьшению величины минимального значения приведенного контактного сопротивления в 50 раз. По-видимому, как в случае несплавного Pd/Ge/Ta/Cu контакта, так и в случае сплавного Ge/Au/Ni/Ta/Au, уменьшение приведенного контактного сопротивления можно связать с действием Ta торцевого диффузионного барьера.

На рис. 3 и 4 представлены фотографии поперечного сечения Pd/Ge/Ta/Cu и Ge/Au/Ni/Ta/Au омических контактов с планарным, а также планарным и торцевым диффузионными барьерами после отжига при температуре $T = 500$ °C, подтверждающие описанные выше закономерности, а также механизмы, их обуславливающие.

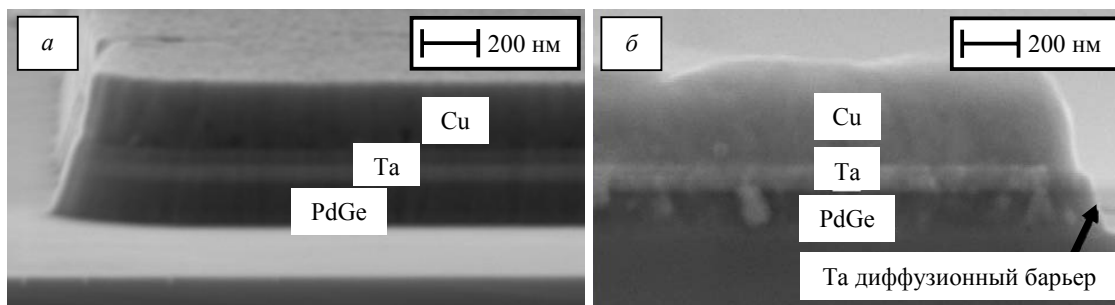


Рис. 3. Микроскопические изображения поперечного сечения Pd/Ge/Ta/Cu омического контакта после термообработки при $T = 500$ °C с планарным (а), а также планарным и торцевым (б) Ta диффузионными барьерами

После температурной обработки при $T = 500$ °C для Pd/Ge/Ta/Cu омического контакта как с торцевым, так и без торцевого диффузионного барьера не происходит взаимодействия верхнего слоя Cu с нижележащими слоями металлизации, а также с GaAs.

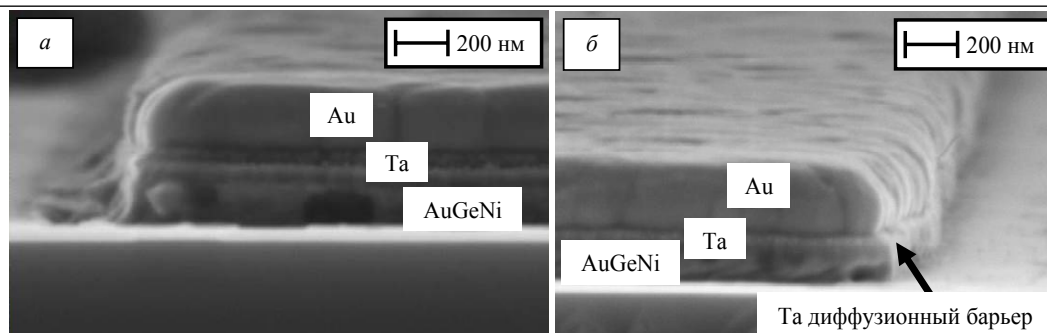


Рис. 4. Микроскопические изображения поперечного сечения Ge/Au/Ni-Ta/Au омического контакта после термообработки при $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ с планарным (а), а также планарным и торцевым (б) Ta диффузионными барьерами

В случае Ge/Au/Ni-Ta/Au омического контакта без торцевого барьера после отжига при $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ на поверхности GaAs рядом с краем контактной площадки наблюдается появление достаточно толстой плёнки проводящего материала (см. рис. 4, а). Её возникновение, по-видимому, связано с активной диффузией верхнего слоя Au по торцам контактной площадки, происходящей во время отжига. Стимулирование диффузии обусловлено жидкофазным механизмом формирования контакта, в результате чего верхняя пленка Au более активно взаимодействует как с нижележащими слоями металлизации, так и GaAs.

Одновременное использование планарного и торцевого диффузионных барьеров позволяет решить данную проблему и увеличить термическую стабильность морфологии края контактной площадки. Данные рис. 4, б свидетельствуют о том, что в этом случае диффузия Au по торцу контактной площадки не наблюдается.

Следует отметить, что полученные результаты хорошо коррелируют с данными работ [13, 14], в которых для Ge/Au/Ni/Ti/Au сплавного омического контакта, но с Ti барьером, осаждённым методом электронно-лучевого испарения, было показано, что введение торцевого барьера в состав металлизации омического контакта предотвращает взаимодействие верхнего слоя Au с нижележащими слоями и увеличивает термическую стабильность морфологии края контактной площадки.

Заключение. В работе представлен сравнительный анализ параметров несплавных Pd/Ge/Ta/Cu и сплавных Ge/Au/Ni-Ta/Au омических контактов к n^+ -GaAs с Ta планарным, а также планарным и торцевым диффузионными барьерами, формируемыми методами магнетронного распыления. Установлено, что одновременное использование планарного и торцевого диффузионных барьеров позволяет уменьшить величину приведенного контактного сопротивления обоих типов омических контактов в 2 и 4 раза соответственно, а также повысить термическую стабильность морфологии края контактной площадки сплавных Ge/Au/Ni-Ta/Au омических контактов. Наблюдаемые эффекты объяснены ограничением диффузии атомов Au или Cu по торцевой поверхности контактной площадки, которое происходит при наличии торцевого диффузионного барьера, и, как следствие, отсутствием взаимодействия верхнего слоя металла с нижележащими слоями и с GaAs.

Авторы благодарны сотрудникам НПК «М» ЗАО «НПФ «Микран» и Научно-образовательного центра ТУСУРа за полезные дискуссии и помощь в проведении работы. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07 сентября 2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – Т. 1. – 456 с.
2. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 561 с.
3. Ерофеев Е.В. Способ формирования субмикронного затвора для GaAs СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов / Е.В. Ерофеев, А.И. Казимиров, И.В. Кулинич // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 53–56.
4. Blank T.V. The current flow mechanism in metal-semiconductor ohmic contacts / T.V. Blank, Y.A. Goldberg // Semiconductors physics and technique. – 2007. – Vol. 41, № 11. – P. 1281–1308.
5. Microstructure studies of PdGe ohmic contacts to n-type GaAs formed by rapid thermal annealing / E.D. Marshall, B. Zhang, L.C. Wang et al. // J. Appl. Phys. – 1987. – № 62. – P. 942–947.
6. Lin Hung-Cheng. Optimization of AuGe–Ni–Au Ohmic Contacts for GaAs MOSFETs / Hung-Cheng Lin, Sidat Senanayake, Keh-Yung Cheng // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2003. – Vol. 50, № 4. – P. 880–885.

7. Hao P.H. On the low resistance Au/Ge/Pd ohmic contact to n-GaAs // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79, № 8. – P. 4216–4220.
8. A Cu-based alloyed Ohmic contact system on n-type GaAs / Ke-Shian Chen, E.Y. Chang, Chia-Ching Lin et al. // J. Applied Physic letters. – 2007. – № 92. – P. 911–913.
9. Казимиров А.И. Формирование медно-германиевого соединения низкотемпературной обработкой в потоке атомарного водорода / А.И. Казимиров, Е.В. Ерофеев, В.А. Кагадей // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2 (24), ч. 2. – С. 68–72.
10. Allan D.A. Diffusion barriers layers for ohmic contacts to GaAs / D.A. Allan, J. Herniman, M.J. Gilbert // Journal de physique. – 1988. – Vol. 49, № 9. – P. 23–27.
11. Novel Cu/Cr/Ge/Pd Ohmic Contacts on Highly Doped n-GaAs / Cheun-Wei Chang, Yuen-Yee Wong, Tung-Ling Hsiehm Edward Chang, Ching-Ting Lee // Journal of Electronic materials. – 2008. – Vol. 37, № 6. – P. 901–904.
12. Chang Chun-Wei. New Cu/Mo/Ge/Pd Ohmic Contacts on Highly Doped n-GaAs for InGaP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors / Chun-Wei Chang, Tung-Ling Hsieh, Edward Yi Chang // Jpn. J. Appl. Phys. – 2006. – № 45. – P. 9029–9032.
13. Multilayer low resistance Ge/Au/Ni/Ti/Au based ohmic contact to n-GaAs / E.V. Erofeev, S.V. Ishutkin, V.A. Kagadei, K.S. Nosaeva // Proceedings of the 5th European Microwave Integrated Circuits Conference. – 2010. – P. 290–293.
14. Erofeev E.V. The features of the low-resistance Ge/Au/Ni/Ti/Au ohmic contact to n-i-GaAs formation / E.V. Erofeev, V.A. Kagadei // Microelectronika. – 2012. – Vol. 41, № 2. – P. 1–8.
15. Reeves G.K. Obtaining the Specific Contact Resistance from Transmission Line Model Measurements / G.K. Reeves, H.B. Harrison // IEEE Electron Dev. Lett. – 1982. – Vol. 3. – P. 111–113.

Ерофеев Евгений Викторович

Канд. техн. наук, инженер-технолог I кат. ЗАО НПФ «Микран»

Тел.: +7-913-887-60-39

Эл. почта: erofeev@sibmail.com

Казимиров Артем Игоревич

Аспирант каф. физической электроники ТУСУРа

Тел.: +7-923-407-93-64

Эл. почта: smart300389@mail.ru

Ишуткин Сергей Владимирович

Аспирант каф. физической электроники ТУСУРа

Тел.: +7-923-482-68-02

Эл. почта: ishsv@sibmail.com

Кагадей Валерий Алексеевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. физической электроники ТУСУРа

Тел.: +7-913-806-40-10

Эл. почта: vak@micran.ru

Erofeev E.V., Kazimirov A.I., Ishutkin S.V., Kagadei V.A.

Ohmic contacts to n^+ -GaAs with sidewall diffusion barrier

This paper presents a comparative analysis of the parameters of non-alloyed Pd/Ge/Ta/Cu and alloyed Ge/Au/Ni/Ta/Au ohmic contacts to n^+ -GaAs, both with planar as well as planar and sidewall diffusion barriers based on Ta films formed by magnetron sputtering. It has been found that use of sidewall diffusion barriers reduces the value of specific contact resistance of ohmic contacts of both types and improves the thermal stability of the edge morphology of the contact pad in the case of alloyed Ge/Au/Ni/Ta/Au ohmic contacts. The effects observed for the samples with effective diffusion barrier are explained by limiting diffusion, as well as limiting the interaction of Au or Cu atoms with underlying metallization layers and with gallium arsenide, taking place along the sidewall surfaces of the ohmic contact.

Keywords: GaAs, ohmic contact, sidewall diffusion barrier, copper, gold.