

УДК 621.372.544.2

Е.В. Ерофеев, А.И. Казимиров

Разработка GaAs СВЧ-транзисторов с металлизацией на основе Al и Cu

Приведены результаты разработки GaAs pHEMT (pseudomorphic high electron mobility transistor – псевдоморфный транзистор с высокой подвижностью электронов) с *T*-образным затвором длиной 150 нм и металлизацией на основе Al и Cu. GaAs pHEMT с омическими контактами на основе Pd/Ge/Al и *T*-образным затвором на основе Ti/Al имел максимальный ток стока по отношению к единице длины затвора $I_{ds} = 320$ мА/мм, напряжение пробоя затвор–сток 7 В и максимальную крутизну вольт-амперной характеристики (ВАХ) $g_m = 400$ мСм/мм. Коэффициент усиления по току составлял 17,3 дБ на частоте 10 ГГц. Максимальная частота усиления по току составляла 80 ГГц при напряжении сток–исток $U_{си} = 2$ В. GaAs pHEMT с омическими контактами на основе Pd/Ni/Ge/Mo/Cu и *T*-образным затвором на основе Ti/Mo/Cu имел максимальный ток стока по отношению к единице длины затвора $I_{ds} = 240$ мА/мм, напряжение пробоя затвор–сток 7 В и максимальную крутизну ВАХ $g_m = 440$ мСм/мм при напряжении сток–исток $U_{си} = 1,5$ В. Коэффициент усиления по току составлял 18,8 дБ на частоте 10 ГГц. Максимальная частота в режиме усиления по току достигала 100 ГГц, а максимальная частота усиления по мощности выше 100 ГГц при напряжении сток–исток $U_{си} = 1,5$ В.

Ключевые слова: GaAs, pHEMT, *T*-образный затвор, омический контакт, медь, алюминий.

В настоящее время в технологии изготовления GaAs pHEMT наиболее распространенными омическими контактами (ОК) к активным областям стока–истока транзистора являются контакты на основе многослойной композиции Ge/Au/Ni [1], а в качестве барьерного контакта (БК) повсеместно используется трехслойная металлизация Ti/Pt/Au. В кремниевой технологии драгоценные металлы не применяются вообще, а для создания металлизации ранее использовался Al, вместо которого сегодня с успехом применяют Cu [2, 3]. По сравнению с Au Cu имеет большую теплопроводность, а также меньшее удельное сопротивление, причем как Cu, так и Al характеризуются существенно меньшей стоимостью. Поэтому в технологии GaAs СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем на их основе переход к металлизации на основе этих металлов должен позволить повысить технические характеристики изделий и уменьшить себестоимость их производства.

Альтернативой ОК Ge/Au/Ni могут послужить контакты на основе Pd/Ge/Cu. К преимуществам контакта Pd/Ge/Cu по сравнению с Ge/Au/Ni аналогом можно отнести пониженное значение слоевого сопротивления, а к недостаткам – пониженную термостабильность электрических параметров контакта, вследствие проникновения быстро диффундирующих атомов меди в GaAs, где они, выступая в роли акцепторной примеси, приводят к компенсации носителей заряда в материале.

В работах [4–6] для лимитирования процессов диффузии Cu из верхнего слоя в нижележащие слои между слоями ОК и верхним проводящим слоем меди был использован дополнительный слой диффузионного барьера на основе пленок тугоплавких материалов Cr, Mo, W, Pt, WN_x и др.

В работе [4] был исследован ОК на основе Pd/Ge/Cr/Cu к n^+ -GaAs. Слой Cr толщиной 40 нм был использован в качестве диффузионного барьера для Cu. Минимальное значение приведенного контактного сопротивления ОК Pd/Ge/Cr/Cu, измеренное методом линий передачи, составило $(5,1 \pm 0,6) \cdot 10^{-7}$ Ом·см² после отжига при температуре $T = 350$ °С в течение $t = 10$ мин. Параметры контакта оставались стабильными при температурах отжига вплоть до $T = 350$ °С. Однако отжиг при $T > 400$ °С приводил к реакции меди с нижележащими слоями с образованием высокоомных фаз Cu_3Ga , Cu_3As , Cu_9Ga_4 и Cr_3Ge , что приводило к росту приведенного контактного и слоевого сопротивлений, а также деградации электрических параметров омического контакта.

В работе [5] был использован омический контакт на основе Pd/Ge/Mo/Cu к n^+ -GaAs при изготовлении гетеробиполярного транзистора. Согласно данным рентгеновской микроскопии, дифракционного анализа и просвечивающей электронной микроскопии омический контакт на основе Pd/Ge/Mo/Cu демонстрировал стабильные значения приведенного контактного сопротивления даже

после отжига при $T > 400$ °С, что свидетельствует о перспективности использования ОК с Cu в технологии изготовления полупроводниковых приборов.

Известно [7], что введение в состав ОК на основе AuGe тонкой пленки Ni позволяет улучшить поверхностную морфологию контакта, а также его электрические параметры. Можно предположить, что если в конструкцию ОК Pd/Ge/Mo/Cu добавить пленку Ni, то Pd/Ni/Ge/Mo/Cu контакт будет демонстрировать меньшее контактное сопротивление и лучшую морфологию поверхности контактной площадки. Однако в настоящее время в литературе нет работ, посвященных исследованию данных омических контактов на основе Cu.

Известно [8], что БК на основе Ti/Al с успехом используются в технологии изготовления рНЕМТ. Однако в настоящее время в литературе нет работ, посвященных исследованию ОК с металлизацией на основе Al.

В настоящей работе исследуются параметры ОК на основе Pd/Ge/Mo/Cu, Pd/Ni/Ge/Mo/Cu и Pd/Ge/Al к n^+ -GaAs; проводится исследование электрических параметров по постоянному току и СВЧ-сигналу изготовленных рНЕМТ с металлизацией ОК на основе Pd/Ni/Ge/Mo/Cu и Pd/Ge/Al и T -образными затворами на основе Ti/Mo/Cu и Ti/Al.

Методика эксперимента. Транзисторы были сформированы на структурах GaAs/AlGaAs/InGaAs, полученных с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. После формирования изоляции транзистора с помощью мезы методом взрывной литографии формировались ОК Pd/Ni/Ge/Mo/Cu (толщины слоев – 15/10/150/50/150 нм соответственно) и Pd/Ge/Al (15/150/150 нм), осажденные с помощью электронно-лучевого испарения в вакууме. Термообработка ОК производилась при температурах $T = 250$ и 350 °С в течение $t = 3$ мин в вакууме.

T -образные затворы на основе Ti/Mo/Cu и Ti/Al с длинами оснований 150 нм были сформированы с использованием электронно-лучевой литографии. Для этого использовались трехслойные резистивные маски на основе 950 PMMA/LOR 5B/495 PMMA. Каждый слой резиста наносился на подложку методом центрифугирования с последующей сушкой при температуре 180°С в течение 5 мин. Экспонирование производилось с помощью системы электронно-лучевой нанолитографии Raith-150^{TWO} с энергией 30 кэВ и диаметром электронного луча 2 нм.

Проявление верхнего слоя 495 PMMA осуществлялось в МИБК:ИПС (1:1) в течение 60 с, среднего слоя LOR 5B – в проявителе MF-319, а нижнего слоя – в МИБК:ИПС (1:3) в течение 30 с с последующей промывкой в ИПС и сушкой в потоке азота.

Для травления подзатворных областей использовался травитель на основе лимонной кислоты. Лимонная кислота (1,5 г) растворялась в 100 мл деионизованной воды, pH раствора подбирался добавлением NH_4OH (30%) до значения 6,2. Затем к раствору добавлялось 2% H_2O_2 (2 мл H_2O_2 :100 мл раствора лимонной кислоты).

Осаждение затворных металлизаций на основе Ti/Mo/Cu (25/25/400 нм) и Ti/Al (50/370 нм) производилось методом электронно-лучевого испарения в вакууме при остаточном давлении атмосферы $5 \cdot 10^{-7}$ Торр.

Исследование морфологии поверхности ОК производилось с помощью сканирующей электронной микроскопии, величина приведенного контактного сопротивления ОК измерялась с помощью метода линий передач (точность измерений составляла ~10%). Параметры транзисторов по постоянному току исследовались при использовании измерителя параметров полупроводниковых приборов HP4156A, а по СВЧ-сигналу – на векторном анализаторе цепей ZVA-40.

Результаты работы. На рис. 1 представлена зависимость величины приведенного контактного сопротивления (ρ) ОК на основе Pd/Ge/Mo/Cu, Pd/Ni/Ge/Mo/Cu (a) и Pd/Ge/Al (b) к n^+ -GaAs ($n = 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³) от температуры термообработки в вакууме в течение времени $t = 3$ мин.

Как свидетельствуют результаты, представленные на рис. 1, ОК на основе Pd/Ge/Mo/Cu достигает минимальной величины контактного сопротивления $\rho = 1 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² после термообработки при $T = 350$ °С в течение $t = 3$ мин в вакууме. Полученные результаты полностью коррелируют с результатами работы [5], в которой оптимальная температура термообработки Pd/Ge/Mo/Cu (15/150/50/150 нм) омического контакта, соответствующая минимальному значению приведенного контактного сопротивления, также составила $T = 350$ °С.

ОК на основе Pd/Ni/Ge/Mo/Cu демонстрировал в 1,5 раза меньшую величину приведенного контактного сопротивления ($\rho = 7 \cdot 10^{-7}$ Ом·см²) по сравнению с Pd/Ge/Mo/Cu омическим контактом.

ОК Pd/Ge/Al достигает минимальной величины контактного сопротивления $\rho = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ после термообработки при $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $t = 3 \text{ мин}$. Дальнейшее увеличение температуры термообработки приводит к монотонному росту величины ρ .

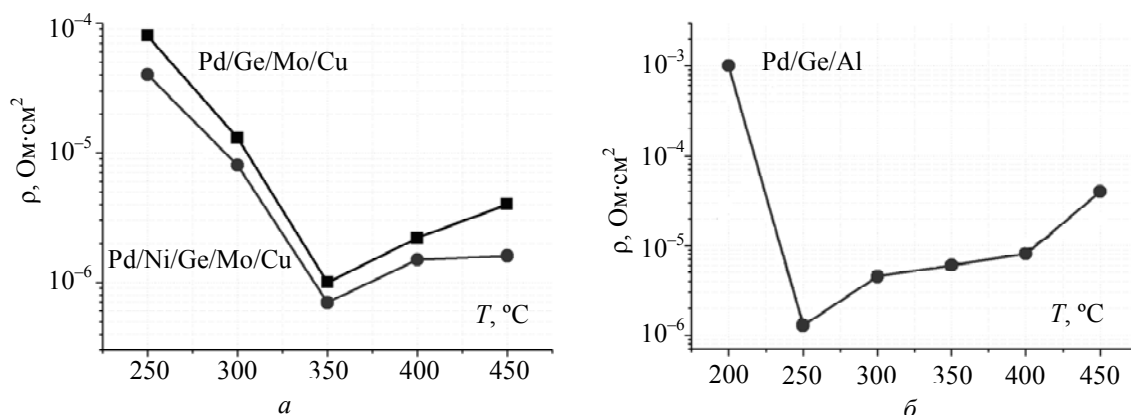


Рис. 1. Зависимость приведенного контактного сопротивления ОК на основе Pd/Ge/Mo/Cu, Pd/Ni/Ge/Mo/Cu (а) и Pd/Ge/Al (б) к n^+ -GaAs ($n = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) от температуры термообработки в вакууме ($t = 3 \text{ мин}$)

На рис. 2 представлены микроскопические изображения поверхностей ОК Pd/Ge/Mo/Cu, Pd/Ni/Ge/Mo/Cu и Pd/Ge/Al после термообработки при $T = 250$ и $450 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $t = 3 \text{ мин}$ в вакууме.

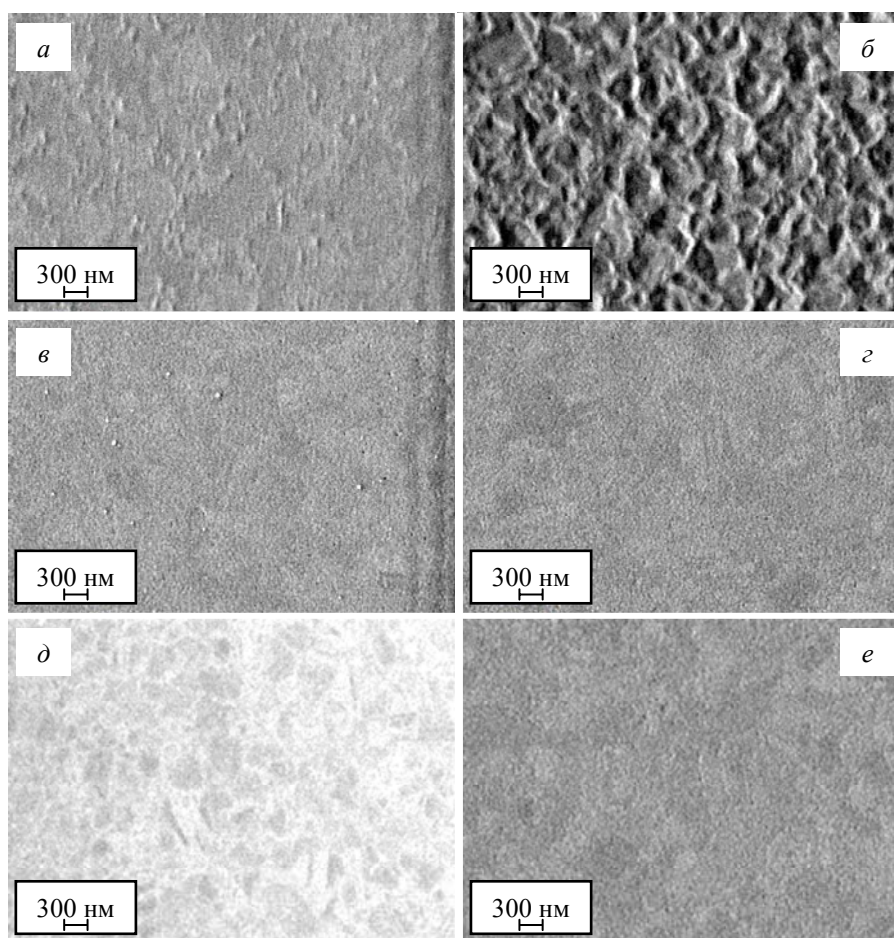


Рис. 2. Микроскопические изображения поверхностей ОК на основе Pd/Ge/Mo/Cu (а, б), Pd/Ni/Ge/Mo/Cu (в, з) и Pd/Ge/Al (д, е) после термообработки при 250 $^\circ\text{C}$ (а, в, д) и 450 $^\circ\text{C}$ (б, з, е) в вакууме ($t = 3 \text{ мин}$)

Из рис. 2 видно, что ОК Pd/Ni/Ge/Mo/Cu имеет гладкую морфологию поверхности контактной площадки в широком диапазоне использованных температур отжига в отличие от аналога на основе Pd/Ge/Mo/Cu, что может свидетельствовать о высокой термической стабильности параметров контакта при его последующей эксплуатации.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований показано, что введение в состав металлизации ОК Pd/Ge/Mo/Cu пленки Ni толщиной 10 нм позволяет уменьшить минимальное значение приведенного контактного сопротивления в 1,5 раза, а также улучшить морфологию поверхности контакта.

Из результатов, представленных на рис. 2, видно, что контакт на основе Pd/Ge/Al демонстрирует гладкую морфологию поверхности во всем диапазоне использованных температур отжига, что может свидетельствовать о высокой термической стабильности параметров контакта при его последующей эксплуатации.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о перспективности использования ОК на основе Pd/Ni/Ge/Mo/Cu и Pd/Ge/Al в технологии изготовления GaAs-транзисторов.

На рис. 3 представлены микроскопические изображения GaAs pHEMT с Pd/Ni/Ge/Mo/Cu ОК и Ti/Mo/Cu T-образным затвором (а) и с ОК на основе Pd/Ge/Al и Ti/Al T-образным затвором (б). Длины затворов обоих транзисторов составляли 150 нм.

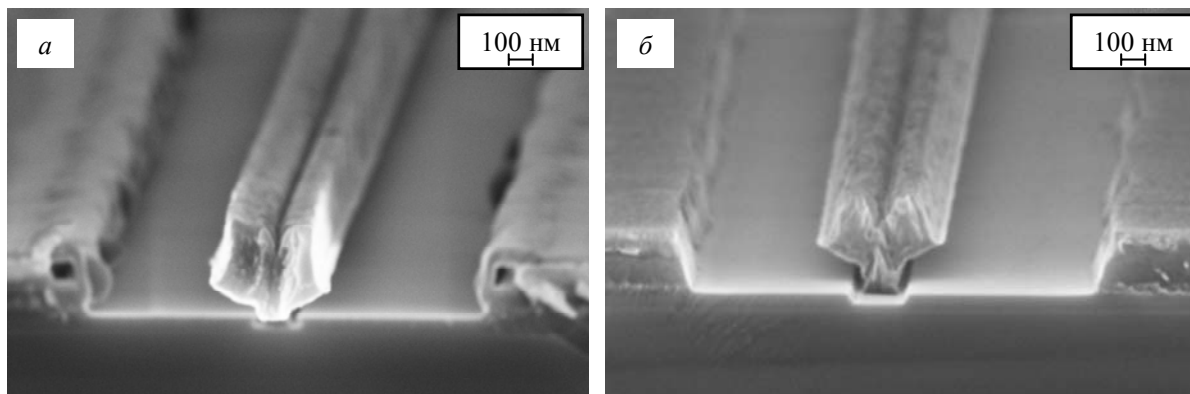


Рис. 3. Микроскопические изображения поперечного сечения транзисторов с ОК Pd/Ni/Ge/Mo/Cu и Ti/Mo/Cu T-образным затвором (а) и с ОК Pd/Ge/Al и Ti/Al T-образным затвором (б)

На рис. 4 представлены измеренные параметры GaAs pHEMT с металлизациями на основе Cu и Al по постоянному току и СВЧ-сигналу.

Разработанный GaAs pHEMT с металлизацией на основе Cu и суммарной шириной затвора 200 мкм имел максимальный ток стока по отношению к единице длины затвора $I_{dss} = 240$ мА/мм, максимальную крутизну ВАХ $g_m = 440$ мСм/мм при напряжении $U_{СИ} = 1,5$ В и напряжение пробоя затвор–сток 7 В. Коэффициент усиления по току составил 18,8 дБ на частоте 10 ГГц. При напряжении сток–исток $U_{СИ} = 1,5$ В максимальная частота усиления по току составляла 100 ГГц, а максимальная частота усиления по мощности – выше 100 ГГц.

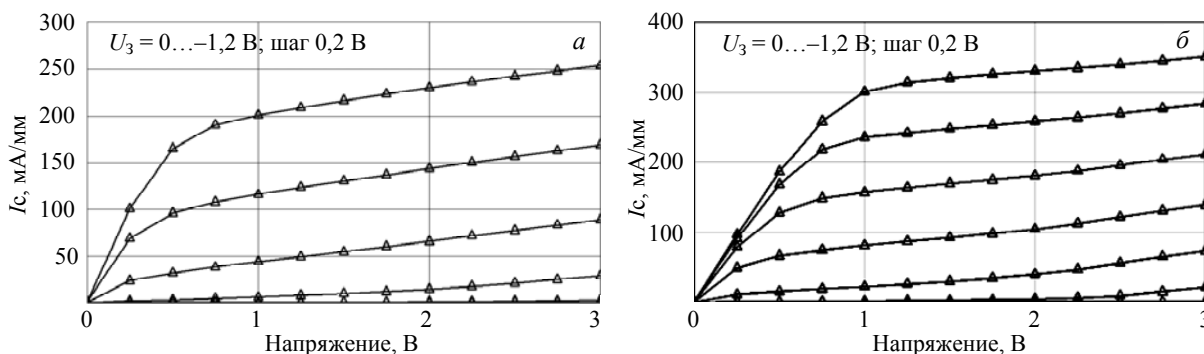


Рис. 4 (начало)

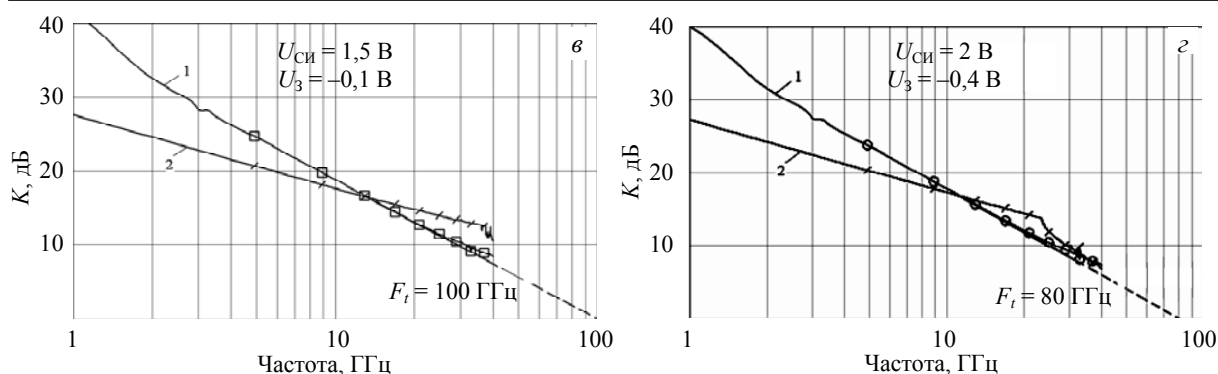


Рис. 4 (окончание). ВАХ (а, б) и зависимость коэффициента усиления по току (1) и максимального коэффициента усиления (2) от частоты (в, г) рНЕМТ с металлизациями на основе Cu (а, в) и Al (б, г)

рНЕМТ с металлизацией на основе Al демонстрирует максимальный ток стока по отношению к единице длины затвора $I_{dss} = 320$ мА/мм, максимальную крутизну ВАХ $g_m = 400$ мСм/мм при напряжении $U_{СИ} = 2$ В и напряжении пробоя затвор–сток 7 В. Коэффициент усиления по току составил 17,3 дБ на частоте 10 ГГц. Максимальная частота усиления по току составляла 80 ГГц при $U_{СИ} = 2$ В.

На основании представленных результатов можно констатировать, что параметры разработанных транзисторов с высокой подвижностью электронов с металлизацией на основе Al и Cu не уступают аналогам на основе Au, известным из литературы. При этом рыночная стоимость Au сегодня в тысячи раз превышает стоимость Cu и Al. Следовательно, отказ от использования Au в составе металлизации рНЕМТ в пользу Cu или Al может снизить стоимость используемых материалов на 10% и более.

Заключение. В работе были разработаны GaAs рНЕМТ с металлизацией на основе Al и Cu. Транзистор с металлизацией на основе Cu демонстрировал ток насыщения сток–исток по отношению к единице длины затвора $I_{dss} = 240$ мА/мм, напряжение пробоя затвор–сток 7 В, крутизну ВАХ $g_m = 440$ мСм/мм, коэффициент усиления по току составил 18,8 дБ на частоте 10 ГГц. При напряжении сток–исток $U_{СИ} = 1,5$ В максимальная частота усиления по току составляла 100 ГГц, а максимальная частота усиления по мощности – выше 100 ГГц.

рНЕМТ на основе Al металлизации демонстрировал ток насыщения сток–исток по отношению к единице длины затвора $I_{dss} = 320$ мА/мм, напряжение пробоя затвор–сток 7 В, крутизну ВАХ $g_m = 400$ мСм/мм, коэффициент усиления по току для транзисторов с суммарной шириной затвора 200 мкм составил 17,3 дБ на частоте 10 ГГц, частота отсечки при $U_{СИ} = 2$ В и $U_{ЗС} = -0,4$ В составила 80 ГГц.

Полученные результаты позволяют рассматривать Al и Cu металлизации рНЕМТ как перспективную замену Au при промышленном производстве СВЧ GaAs монолитных интегральных схем.

Авторы работы выражают благодарность коллективу научно-образовательного центра по нанотехнологиям при ТУСУРе за помощь и обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Carl Zeiss и У.М.Н.И.К. фонда Бортника, Министерства образования и науки РФ в соответствии с гос. контрактом №14.740.11.1432 от 03.11.2011 по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы», а также договором 74/10 в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Bruce R.A. An Improved AuGeNi Ohmic Contact to n-type GaAs / R.A. Bruce, G.R. Piercy // Solid St. Electron. – 1987. – Vol. 30, № 7. – P. 729–737.
2. Tantalum as a Diffusion Barrier Between Copper and Silicon: Failure Mechanism and Effect of Nitrogen Additions / K. Holloway, P.M. Fryer, C. Cabral et al. // J. Appl. Phys. – 1992. – Vol. 71, № 11. – P. 5433–5444.
3. Yoon D.S. Effect on thermal stability of a Cu/Ta/Si heterostructure of the incorporation of cerium oxide into the Ta barrier / D.S. Yoon, H.K. Baik, S.M. Lee // J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 83, № 12. – P. 8074–8076.

4. Novel Cu/Cr/Ge/Pd Ohmic Contacts on Highly Doped *n*-GaAs / C.W. Chang, Y.Y. Wong, T.L. Hsieh et al. // Journal of Electronic materials. – 2008. – Vol. 37, № 6. – P. 901–904.
5. Chang C.W. New Cu/Mo/Ge/Pd Ohmic Contacts on Highly Doped *n*-GaAs for InGaP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors / C.W. Chang, T.L. Hsieh, E.Y. Chang // Jpn. J. Appl. Phys. – 2006. – № 45. – P. 9029–9032.
6. Пат. № 7 368 822 США; опубл. 06.05.2008.
7. Lin H.C. Sidat Senanayake, Keh-Yung Cheng . Optimization of AuGe–Ni–Au Ohmic Contacts for GaAs MOSFETs /H.C. Lin, S. Senanayake, K.Y. Cheng // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2003. – Vol. 50, № 4. – P. 880–885.
8. Improvement of 0,1 μm -gate InGaAs/AlGaAs HEMT Performance by Suppression of Electrochemical Etching in Deionized Water / T. Ohshima, R. Shigemasa, M. Sato et al. // Solid State Electron. – 1999. – Vol. 43, № 8. – P. 1519–1526.

Ерофеев Евгений Викторович

Инженер-технолог I кат. ЗАО НПФ «Микран»,
аспирант каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-913-887-60-39
Эл. почта: erofeev@sibmail.com

Казимиров Артем Игоревич

Магистрант каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: 8-923-407-93-64
Эл. почта: smart300389@mail.ru

Erofeev E.V., Kazimirov A.I.

The fabrication of GaAs Cu- and Al-metalized high electron mobility transistors

The Au free fully Cu-metalized GaAs pHEMT using developed Pd/Ni/Ge/Mo/Cu based ohmic contacts and Ti/Mo/Cu 150 nm *T*-shape gate has been successfully fabricated for the high-frequency applications. The fabricated Cu-metalized pHEMT has a maximum drain current of 240 mA/mm, off-state gate-drain breakdown of 7 V and a transconductance peak of 440 mS/mm at $U_{ds} = 1,5$ V. The maximum stable gain value was about 18,8 dB at frequency 10 GHz. The current gain cut-off frequency of the copper metalized device is about 100 GHz at $U_{ds} = 1,5$ V.

The Au free fully Al-metalized GaAs pHEMT using developed Pd/Ge/Al based ohmic contacts and Ti/Al 150 nm *T*-shape gate has been successfully fabricated for the high-frequency applications. The fabricated Al-metalized pHEMT has a maximum drain current of 320 mA/mm, off-state gate-drain breakdown of 7 V and a transconductance peak of 400 mS/mm at $U_{DS} = 2$ V. The maximum stable gain value was about 17,3 dB at frequency 10 GHz. The current gain cut-off frequency of the copper metalized device is about 80 GHz at $U_{ds} = 2$ V.

Keywords: GaAs, pHEMT, ohmic contacts, *T*-shape gate, copper, aluminium.