

УДК 621.372.544.2

Е.В. Ерофеев, В.А. Кагадей, С.В. Ишуткин, К.С. Носаева, Е.В. Анищенко, В.С. Арыков

Разработка бездрагметального GaAs pHEMT-транзистора с субмикронным Т-образным затвором

Приведены результаты разработки полностью бездрагметального GaAs pHEMT-транзистора с омическими контактами на основе Cu/Ge и Т-образным затвором Ti/Mo/Cu с длиной основания 150 нм. Разработанный транзистор имел максимальный ток стока 360 мА/мм, напряжение пробоя затвор-сток 7 В и максимальную крутизну 320 мСм/мм при напряжении $V_{сн} = 3$ В. Коэффициент усиления по току составлял 15 дБ на частоте 10 ГГц. Максимальная частота усиления по току составляла 60 ГГц при $V_{сн} = 3$ В.

Ключевые слова: GaAs, pHEMT, Т-затвор, омический контакт.

Медная металлизация монокристаллических интегральных схем (МИС) уже на протяжении многих лет широко используется в кремниевой микроэлектронике [1–3]. Однако в технологии GaAs существует лишь несколько работ по использованию меди в составе металлизации [4–6]. К преимуществам медной металлизации по сравнению с традиционной золотой для GaAs микроэлектроники можно отнести повышенную электро- и теплопроводность, а также значительно меньшую стоимость. Замена золотой межэлементной разводки на медную в технологии GaAs pHEMT может в значительной мере повысить быстродействие МИС [7]. К недостаткам меди в GaAs-технологии можно отнести высокую диффузионную способность, где медь, выступая в роли акцепторной примеси, может привести к компенсации проводимости в материале, кроме того, медь легко окисляется на воздухе, что в итоге усложняет технологию производства МИС и предъявляет особые требования к разработке диффузионных барьеров и пассивирующих покрытий для меди.

В работах [8–10] представлен омический контакт на основе композиции Cu/Ge с низким значением приведенного контактного сопротивления, высокой термостабильностью параметров, гладкой морфологией поверхности контактной площадки, а также низкой стоимостью из-за отсутствия драгоценных металлов. Все это делает перспективным использование омического контакта Cu/Ge в технологии GaAs монокристаллических интегральных схем.

В данной работе приведены результаты исследований электрических параметров полностью бездрагметального GaAs pHEMT-транзистора с омическими контактами на основе композиции Cu/Ge и субмикронным Т-образным затвором на основе Ti/Mo/Cu.

Транзистор был сформирован на псевдоморфных структурах GaAs/AlGaAs/InGaAs, полученных с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. После формирования изоляции транзистора с помощью мезы методом взрывной литографии формировались омические контакты на основе Cu/Ge (122 нм/78 нм), осажденные с помощью электронно-лучевого испарения в вакууме. Термообработка омических контактов производилась в инертной среде при температуре $T = 440$ °С в течение $t = 3$ мин.

Т-образный затвор на основе Ti/Mo/Cu с длиной основания 150 нм был сформирован с использованием электронно-лучевой литографии. Для этого использовалась трехслойная резистивная маска на основе 950 РММА/LOR 5В/495 РММА. 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.

Проявление верхнего слоя 495 РММА осуществлялось в МИБК:ИПС (1:1) в течение 60 с, среднего слоя LOR 5В – 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 подзатворной области 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). После приготовления раствор выдерживался в течение 2 ч для установления равновесия в растворе.

Осаждение затворной металлизации на основе Ti/Mo/Cu (20 нм/20 нм/400 нм) производилось методом электронно-лучевого испарения в вакууме при остаточном давлении атмосферы 5×10^{-7} торр.

Параметры полученных транзисторов по постоянному току измерялись с помощью Tektronix 370A, исследование S -параметров производилось на измерителе ZVA-40.

На рис. 1 представлено микроскопическое изображение GaAs рНЕМТ-транзистора с Ti/Mo/Cu затвором с длиной основания 150 нм.

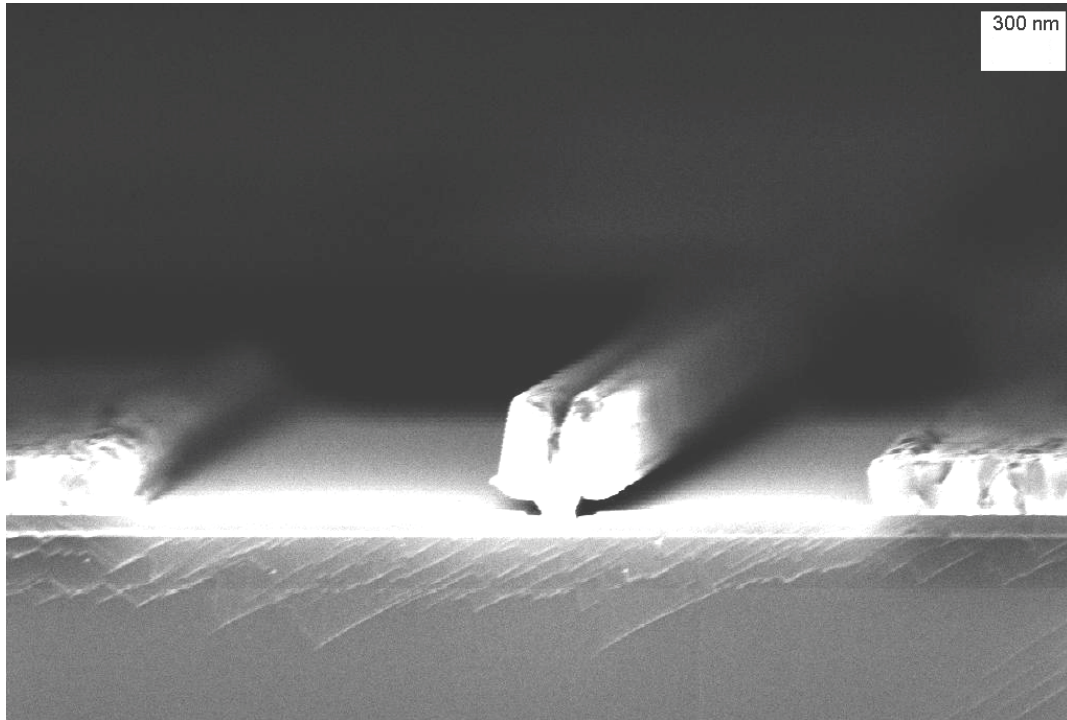


Рис. 1. Микроскопическое изображение GaAs рНЕМТ-транзистора с Ti/Mo/Cu затвором с длиной основания 150 нм

На рис. 2 и 3 представлены DC- и RF-параметры разработанного бездрагметального GaAs рНЕМТ-транзистора.

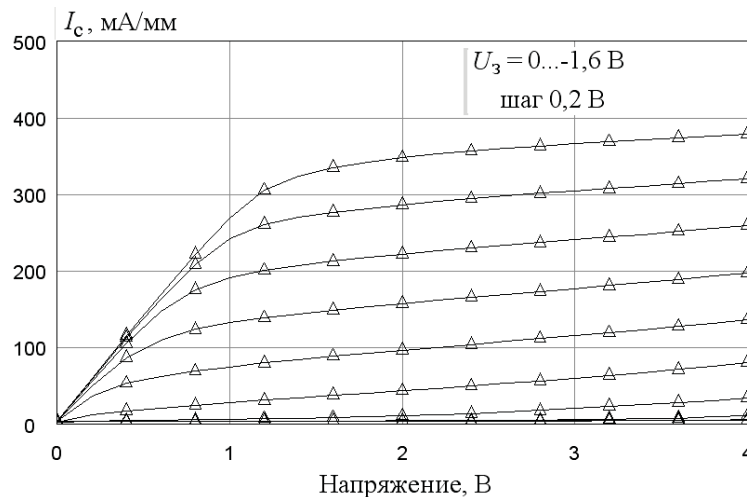


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики бездрагметального GaAs рНЕМТ-транзистора

Длина основания Т-образного затвора Ti/Mo/Cu составила 150 нм при общей ширине затвора 100 мкм. Расстояние исток-сток составляло 3 мкм.

Разработанный бездрагметальный GaAs рНЕМТ-транзистор имел максимальный ток стока 360 мА/мм, напряжение пробоя затвор-сток 7 В и максимальную крутизну 320 мСм/мм при напряжении $V_{си} = 3$ В.

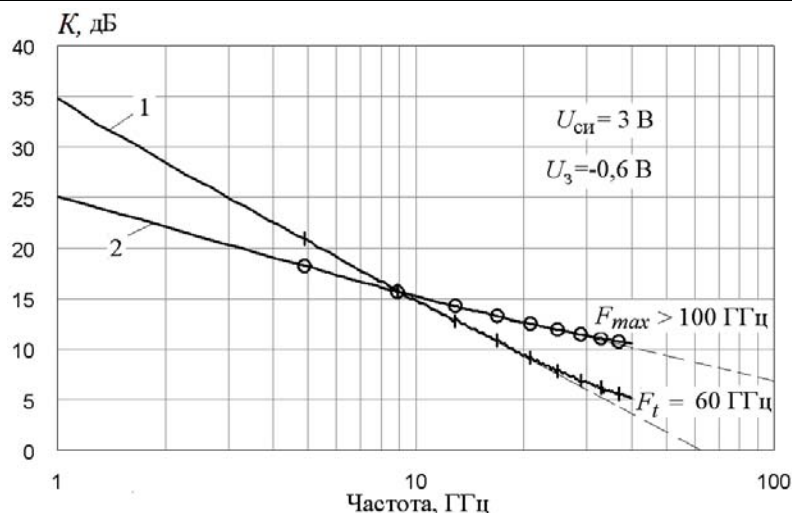


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления по току (1) и максимального коэффициента усиления (2) от частоты

Коэффициент усиления по току составил 15 дБ на частоте 10 ГГц. Максимальная частота усиления по току составляла 60 ГГц на $V_{си} = 3$ В, при максимальной частоте генерации свыше 100 ГГц.

Измеренные DC- и RF-параметры полностью бездрагметального GaAs pHEMT-транзистора практически не отличаются от параметров аналогичных транзисторов с металлизацией на основе золота.

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

- Holloway K. Tantalum as a diffusion barrier between copper and silicon / K. Holloway, P. M. Fryer // Appl. Phys. Lett. – 1990. – Vol. 57, №17. – P. 1736–1738.
- Tantalum as a diffusion barrier between copper and silicon: failure mechanism and effect of nitrogen additions / K. Holloway, P. M. Fryer, C. Cabralet al. // J. Appl. Phys. – 1992. – Vol. 71, №. 11. – P. 5433–5444.
- 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.
- Thermal stability of Cu/Ta/GaAs multilayers / Ch. Chang-You, L. Chang, E.Y. Chang et al. // Appl. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 77, №21. – P. 3367–3369.
- Backside copper metallization of GaAs MESFETs / Ch. Chang-You, E.Y. Chang, L. Chang, Ch. Szu-Hun // Electronics Lett. – 2000. – Vol. 36, №15. – P. 1318–1319.
- Backside copper metallization of GaAs MESFETs using TaN as the diffusion barrier / Ch. Chang-You, E.Y. Chang, L. Chang, Ch. Szu-Hun // IEEE Trans. Electron Devices. – 2001. – Vol. 48, № 6. – P. 1033–1036.
- Use of WN_x as the diffusion barrier for copper airbridged low noise GaAs pHEMT / H.C. Chang, E.Y. Chang, Y.C. Lien et al. // Electron. Lett. – 2003. – Vol. 39. – P. 1763.
- Aboelfotoh M.O. Novel low-resistance Ohmic contact to n-type GaAs using Cu_3Ge / M.O. Aboelfotoh, C.L. Lin, J.M. Woodall // Appl. Phys. Lett. – 1994. – Vol. 65, №25. – P. 3245.
- Oktyabrsky S. Microstructure and chemistry of Cu-Ge Ohmic Contact Layers to GaAs / S. Oktyabrsky, M.O. Aboelfotoh, J. Narayan // Journal of Electronic Materials. – 1996. – Vol. 25, №11. – P. 1125.
- Electrical and microstructural characteristics of GeCu Ohmic contacts to N-type GaAs / M.O. Aboelfotoh, S. Oktyabrsky, J. Narayan, J.M. Woodall // J. Mater. Res. – 1997. – Vol. 12, № 9. – P. 2325–2332.

Ерофеев Евгений Викторович

Аспирант каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: +7-913-887-60-39
Эл. почта: erofeev@sibmail.com

Кагадей Валерий Алексеевич

Д-р физ.-мат. наук, проф/ каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: +7-913-806-40-10
Эл. почта: vak@micran.ru

Ишуткин Сергей Валерьевич

Аспирант каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: +7-923-482-68-02
Эл. почта: ishsv@sibmail.com

Носаева Ксения Сергеевна

Аспирант каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: +7-923-414-04-11
Эл. почта: ksenianosaeva@sibmail.com

Анищенко Екатерина Валентиновна

Ведущий инженер ЗАО «НПФ Микран»
Тел.: +7-913-823-00-23
Эл. почта: aev@micran.ru

Арыков Вадим Станиславович

Зам. главного технолога ЗАО «НПФ Микран»
Тел.: +7-903-953-10-37
Эл. почта: arykov@micran.ru

Erofeev E.V., Kagadei V.A., Ishutkin S.V., Nosaeva K.S., Anichenko E.V., Arykov V.S.
Design of non-precious metals GaAs pHEMT with submicron length T-shape gate

The design results of completely Cu-metalized GaAs pHEMT with Cu/Ge based ohmic contacts and 150 nm T-shape Ti/Mo/Cu gate are presented. The designed Cu-metalized pHEMT has a maximum drain current of 360 mA/mm, off-state gate-drain breakdown of 7 V, and transconductance maximum value of 320 mS/mm at $V_{DS} = 3V$. The maximum stable gain value was about 15 dB at frequency 10 GHz. The current gain cut-off frequency of the copper metalized device was about 60 GHz at $V_{ds} = 3 V$, and maximum frequency of oscillations was beyond 100 GHz.

Keywords: GaAs, pHEMT, T-gate, Ohmic contact.