УДК 621.372.544.2

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

Исследование термостабильности параметров бездрагметалльного GaAs pHEMT транзистора с металлизацией на основе CuGe-соединений

Представлены результаты сравнительного исследования термостабильности параметров по постоянному току и CBЧ-сигналу GaAs pHEMT на основе CuGe омических контактов и Ti/Mo/Cu затвора и GaAs pHEMT, с металлизацией на основе CuGe-соединения, полученного низкотемпературной обработкой в потоке атомарного водорода. Транзистор с CuGe металлизацией и длиной затвора 170 нм имел максимальный ток стока 560 мА/мм, напряжение пробоя затвор-сток 7 В, крутизну 380 мСм/мм при $U_{cu} = 3$ В. Максимальный коэффициент усиления по току транзистора составлял 16.8 дБ на частоте 10 ГГц при граничной частоте отсечки по току в 80 ГГц. Термоиспытания транзисторов обоих типов, проводившиеся при температуре 250°C в течение 120 мин в атмосфере азота, показали, что pHEMT с медно-германиевой (CuGe) металлизацией обладает существенно большей термостабильностью электрических параметров, чем транзистор на основе CuGe омических контактов и Ti/Mo/Cu затвора. **Ключевые слова:** GaAs, pHEMT, CuGe-соединения, термостабильность.

Медная металлизация монолитных интегральных схем (МИС) уже на протяжении многих лет широко используется к кремниевой микроэлектронике [1, 2]. Однако в технологии GaAs существует лишь несколько работ по использованию меди в составе металлизации [3, 4]. 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, а также снизить себестоимость их производства.

В работе [5] мы сообщали о создании CBЧ GaAs pHEMT с металлизацией на основе меди, в котором использовались разработанные CuGe омические контакты и Ti/Mo/Cu T-образный затвор с длиной основания 150 нм. Изготовленный транзистор имел хорошие параметры как по постоянному току, так и по CBЧ-сигналу. Однако высокая диффузионная активность меди может привести к деградации электрических параметров устройства за счет компенсации проводимости в материале [6]. 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.

Возможным решением данной проблемы может быть использование медных соединений – силицидов (CuSi) или германидов (CuGe) меди [7]. Однако силициды меди легко реагируют с кислородом, оказавшись в среде воздуха или кислорода, что приводит к деградации их электрофизических свойств и увеличению значения удельного сопротивления. В отличие от силицидов, медногерманиевые соединения, в частности Cu₃Ge, удовлетворяют требованиям, которые предъявляют к материалам, используемым для создания приборов на основе GaAs [8–11]. Однако для формирования соединений CuGe требуется высокотемпературная обработка ($T \ge 400$ °C) в вакууме в течение длительного времени (t = 20-30 мин), что несовместимо с технологическим процессом взрывной литографии, так как высокие температуры критичны для всех видов резистов, используемых сегодня в промышленности.

Известно [12], что обработка в потоке атомарного водорода при температурах, близких к комнатной, может стимулировать гетеродиффузию тонких пленок Au, Ni, Cu, In в различные системы твердых тел за счет энергии рекомбинации атомов водорода в молекулу на поверхности твердого тела.

В настоящей работе исследуется возможность использования CuGe-соединений, полученных низкотемпературной обработкой исходных компонентов в потоке атомарного водорода, как материала металлизации для CB4 GaAs pHEMT; проводится исследование электрических параметров

изготовленного транзистора с металлизацией на основе медно-германиевых соединений, а также их термостабильности.

Методика эксперимента. В экспериментах по созданию рНЕМТ использовались эпитаксиальные структуры AlGaAs/InGaAs/GaAs, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Описание использованной в экспериментах гетероструктуры представлено в работе [5].

После формирования меза-изоляции производилось формирование двухслойной фоторезистивной маски. Затем методом электронно-лучевого испарения при давлении остаточной атмосферы 1×10^{-6} торр производилось осаждение двухслойной металлизации Cu/Ge (122/78 нм). Образцы разделялись на две группы *A* и *B*. Образцы группы *A* не подвергались обработке в потоке атомарного водорода. Образцы группы *B* подвергались обработке в потоке атомарного водорода с плотностью 10^{15} ат. см² с⁻¹ в течение t = 5 мин при комнатной температуре. Затем методом взрывной литографии формировался рисунок омических контактов. Образцы обеих групп проходили термообработку с целью формирования омических контактов. Термообработка производилась в вакууме при температуре T = 400 °C в течение t = 10 мин.

Формирование *T*-образного затвора транзистора длиной 170 нм производилось при использовании электронно-лучевого литографа Raith-150^{TWO} по методике, описанной в работе [5]. Осаждение металлизации T-образного затвора производилась методом электронно-лучевого испарения в вакууме 5×10^{-7} торр. На образцы групп *A* и *B* производилось осаждение следующих многослойных композиций Ti/Mo/Cu (25/25/200 нм) и Ti/Mo/Ge/Cu (50/50/78/122 нм), соответственно. После чего, образцы группы *B* подвергалась обработке в потоке атомарного водорода с плотностью 10^{15} ат. см² с⁻¹ в течение t = 5 мин при комнатной температуре. Образцы группы *A* не подвергались обработке в атомарном водороде. Затем методом взрывной литографии формировался рисунок затвора. Далее все образцы подвергались термоиспытаниям в среде очищенного азота при температуре T = 250 °C в интервале времени t = 5-120 мин. В целях облегчения определения механизмов деградации транзисторов пассивация их поверхности слоем диэлектрика не проводилась.

Исследование морфологии поверхности омических контактов и затвора производилось с помощью сканирующей электронной микроскопии. Параметры транзисторов по постоянному току исследовались при использовании измерителя HP4156A, а по CBЧ-сигналу – на ZVA-40.

Результаты

1. Электрические параметры GaAs pHEMT

На рис. 1 представлено микроскопическое изображение полностью Cu/Ge GaAs pHEMTтранзистора с *T*-образным затвором длиной 170 нм.



Рис. 1. Микроскопическое изображение Cu/Ge GaAs pHEMT транзистора с *T*-образным затвором длиной 170 нм

На рис. 2 и 3 представлены электрические *DC*- и *RF*-параметры pHEMT с CuGe омическими контактами и Ti/Mo/Cu затвором (группа A) и полностью CuGe pHEMT, полученного с использованием обработки в потоке атомарного водорода (группа B). Транзисторы образцов групп A и B демонстрируют ток насыщения сток-исток $I_{cuH} = 520$ и 560 мА/мм, напряжение пробоя затвор-сток $U_{3c} = 7$ B, крутизну $S_m = 320$ и 380 мСм/мм при $U_{cu} = 3$ B соответственно (рис. 2). Максимальный коэффициент усиления по току транзисторов групп A и B составил 14.2 и 16.8 дБ на частоте 10 ГГц при граничной частоте отсечки по току – 60 и 80 ГГц при $U_{cu} = 3$ B и $I_{cu} = 1/4 \cdot I_{cuH}$ соответственно (рис. 3).



Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления по току рНЕМТ групп A (1) и B (2) и рНЕМТ группы В после термоиспытаний (3) от частоты

Таким образом, транзисторы группы В демонстрируют лучшие параметры как по постоянному току, так и на СВЧ-сигнале, по сравнению с транзисторами группы А.

2. Термическая стабильность параметров рНЕМТ

На рис. 4 представлены зависимости DC параметров транзисторов групп A и B от времени их термообработки при температуре T = 250 °C в среде очищенного азота. В процессе термообработки у образцов обеих групп наблюдается

у ооразцов ооеих групп наолюдается постепенная деградация параметров, что частично может быть обусловлено деградацией CuGe омического контакта.

Рис. 4. Зависимость максимального тока стока (1, 2) и крутизны (3, 4)рНЕМТ групп А (1, 3) и В (2, 4) от времени отжига при температуре T = 250 °C в среде азота



На рис. 5 представлены зависимости параметров барьера Шоттки транзисторов групп А и В от времени термообработки. Для транзисторов группы А наблюдается существенная деградация параметров Ті/Мо/Си барьера Шоттки (рис. 5, кривые 1, 3), что может быть обусловлено диффузией меди из шляпы затвора к поверхности AlGaAs и GaAs в процессе термообработки и компенсацией носителей в приповерхностных слоях полупроводника. Транзисторы группы В демонстрируют



существенно лучшие значения термостабильности параметров барьеров Шоттки, которые практически не деградировали после термоиспытаний.

Рис. 5. Зависимость высоты барьера Шоттки $F_h(1, 2)$ и напряжения пробоя затвор-сток $U_{3c \text{ проб}}(3, 4)$ рНЕМТ групп A (1, 3) и B (2, 4) от времени отжига при температуре T = 250 °C в среде азота

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента усиления от частоты для транзистора группы В (кривая 3). Видно, что в результате термообработки в течение 120 мин максимальный коэффициент усиления по току на частоте 10 ГГц уменьшился с 16.8 до 15 дБ, а граничная частота отсечки по току уменьшилась с 80 до 55 ГГц. Транзисторы группы А после термоиспытаний деградировали полностью, что не позволило провести на них измерения СВЧ-параметров.

С целью выявления причин деградации параметров транзисторов были выполнены микроскопические исследования, результаты которых представлены на рис. 6. Термообработка транзисторов обеих групп приводит к изменению формы шляпы Т-образного затвора, а также увеличению длины его ножки. Для транзистора группы А длина ножки затвора увеличилась сильнее, чем для транзистора группы В. У образцов группы А наблюдается существенная диффузия меди и обволакивание Т-образного затвора пленкой меди вплоть до ее соприкосновения с полупроводником. Очевидно, что это и является причиной быстрой деградации параметров транзисторов группы А. Для образцов группы В, в связи с образованием CuGe-соединения в верхних слоях металлизации затвора, наблюдается меньшая диффузия и приращение длины затвора и более высокая термостабильность параметров полностью CuGe pHEMT.



Рис. 6. Микроскопические изображения поперечного сечения рНЕМТ групп А (a, δ) и В (e, ϵ) после отжига при температуре T = 250 °C в течение *t* = 120 мин; увеличение 20,000x (*a*, *в*); увеличение 50,000x (б, *г*)

Доклады ТУСУРа, № 2 (24), часть 2, декабрь 2011

Таким образом, полностью CuGe GaAs pHEMT, сформированный при использовании низкотемпературной обработки в потоке атомарного водорода, характеризуется лучшей термостабильностью параметров по сравнению с транзистором на основе CuGe омических контактов и Ti/Mo/Cu затвора, изготовленного без использования обработки в атомарном водороде.

Полностью CuGe GaAs pHEMT с точки зрения надежности пока не обладает достаточной термостабильностью, однако пассивация поверхности транзистора слоем диэлектрика (Si_xN_y) должна увеличить его термостабильность и приблизить ее к требуемым значениям. В этом случае переход на CuGe-соединение позволит отказаться от Au, Pt и Pd при промышленном изготовлении GaAs монолитных интегральных схем.

Известно, что атомарный водород легко проникает и накапливается в слоях металлов и полупроводников, приводя к пассивации носителей в GaAs и твердых растворов на его основе, что является одним из механизмов деградации параметров транзисторов. В связи с этим поиск альтернативных методов низкотемпературного формирования CuGe-соединений без использования атомарного водорода является актуальной задачей.

Заключение. СВЧ GaAs pHEMT с металлизацией на основе CuGe-соединений, полученных с помощью обработки в потоке атомарного водорода, обладает лучшими DC- и RF-параметрами и более высокой термостабильностью, чем pHEMT на основе CuGe омических контактов и Ti/Mo/Cu затвора, изготовленного без использования обработки в атомарном водороде.

Полученные результаты позволяют рассматривать CuGe-соединение как перспективную замену Au, Pt и Pd при промышленном производстве CB4 GaAs монолитных интегральных схем.

Работа была проведена при финансовой поддержке грантов Carl Zeiss и У.М.Н.И.К. фонда Бортника, хоз. договора 74/10 между ФГБОУ ВПО ТУСУР и ЗАО «НПФ «Микран», гос. контракта №14.740.11.1432 от 03.11.2011 по федеральной целевой программе «Научные и научнопедагогические кадры инновационной России 2009–2013».

Авторы работы выражают благодарность коллективу научно-образовательного центра по нанотехнологиям при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия) за помощь и обсуждение результатов.

Литература

1. 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.

2. Yoon D.S. Effect of 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, $N_{\rm D}$ 12. – P. 8074–8076.

3. Thermal Stability of Cu/Ta/GaAs Multilayers / C.Y. Chen, L. Chang, E.Y. Changet al. // Appl. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 77, № 21. – P. 3367–3369.

4. Backside Copper Metallization of GaAs MESFETs using TaN as the Diffusion Barrier / C.Y. Chen, E.Y. Chang, L. Chang, S.H. Chen // IEEE Trans. Electron Devices. – 2001. – Vol. 48, № 6. – P. 1033–1036.

5. 150 nm Copper Metalized GaAs pHEMT with Cu/Ge Ohmic Contacts / V.A. Arykov, E.V. Anichenko, E.V. Erofeev, V.A. Kagadei // Proceedings of the 5th European Microwave Integrated Circuits Conference (Paris, France). – 2010. – P. 166–169.

6. 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. 201–205.

7. Chang E.Y. Formation of Copper Silicides from Cu(100)/Si(100) and Cu(111)/Si(111) Structures // J. Appl. Phys. -1990. $-N_{0}$ 67. -P. 566–568.

8. Pat. 5 288 456 US, IBMC C 22 C 9/00. Compound with Room Temperature Electrical Resistivity Comparable to that of Elemental Copper / M.O. Aboelfotoh, M.J. Brady, L. Krusin-Embaum (US). – filed 23.02.1993; date of patent 22.02.1994.

9. 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. – P. 3245.

10. Oktyabrsky S. 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. 132–136.

11. Aboelfotoh M.O. Electrical and Microstructural Characteristics of GeCu Ohmic Contacts to n-type GaAs / M.O. Aboelfotoh, S. Oktyabrsky, J. Narayan // J. Mater. Res. – 1997. – Vol. 12, № 9. – P. 2325–2332.

12. Matyushin V.M. Influence of Defect Generation on Low-Temperature Diffusion of Au in Ge Under Influence of Atomic Hydrogen / V.M. Matyushin, R.V. Martynyuk // Journ. Functional Materials. – 2001. – Vol. 8, N 2. – P. 401–404.

Ерофеев Евгений Викторович Инженер-технолог 1-й 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

Кагадей Валерий Алексеевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. физической электроники ТУСУРа Тел.: 8-913-806-40-10 Эл. почта: vak@micran.ru

Erofeev E.V., Kazimirov A.I., Kagadei V.A. Thermal stability of base metal Cu/Ge metallized GaAs pHEMT

The article presents the results of thermostability research of GaAs pHEMT DC and RF parameters on the basis of Cu/Ge ohmic contacts and Ti/Mo/Cu gate and GaAs pHEMT completely executed on the basis of CuGe compounds. The transistor with complete Cu/Ge metallization and the gate length of a 170 nm had the maximal drain current of 560 mA/mm, a gate-drain breakdown voltage of 7 V, and transconductance maximum value of 380 mS/mm at $U_{DS} = 3$ V. The maximum stable gain value was about 16,8 dB at frequency 10 GHz at current gain cut-off frequency of 80 GHz. Termostability tests of both types transistors were spent at temperature 250°C during 120 min in a pure nitrogen environment. PHEMT with complete Cu/Ge metallization has greater thermostability of DC and RF parameters, than the transistor on the basis of CuGe ohmic contacts and Ti/Mo/Cu gate.

Keywords: GaAs, pHEMT, CuGe compounds, thermostability.