УДК 621.382.323

МАЛОШУМЯЩИЕ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫЕ УСИЛИТЕЛИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ ПОВЫШЕННЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ

С.В.Платонов, Н.В.Пермяков*, Б.И.Селезнев, В.А.Мошников*, Э.Ю.Козловский, А.М.Осипов****

Институт электронных и информационных систем НовГУ, Boris.Seleznev@novsu.ru
**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*
***ЗАО «НПП «Планета-Аргалл»*

Методом атомно-силовой микроскопии проведен анализ физической структуры арсенид-галлиевых малошумящих усилителей при воздействии электромагнитных помех повышенных интенсивностей с целью определения основных механизмов отказов. В качестве активных элементов усилителей использованы полевые транзисторы с барьером Шоттки на псевдоморфных гетероэпитаксиальных структурах с высокой подвижностью электронов. Предложен механизм изменения физической структуры металлизации.

Ключевые слова: арсенид галлия, транзистор pHEMT, малошумящий усилитель, электромагнитная помеха, металлизация, атомно-силовая микроскопия

By atomic force microscopy the analysis of physical structure of gallium-arsenide low-noise amplifiers under the influence of electromagnetic interference of high intensities in order to determine the basic mechanisms of failure was carried out. The field-effect transistors with a Schottky barrier at the pseudomorphic heteroepitaxial structures with high electron mobility were used as the active elements of amplifiers. The mechanism of changing the physical structure of the metallization is proposed.

Keywords: gallium arsenide, pHEMT-transistor, low-noise amplifier, electromagnetic interference, metallization, atomic force microscopy

В современной радиоэлектронной аппаратуре СВЧ диапазона во входных каскадах широко применяются малошумящие усилители на арсенид-галлиевых (GaAs) полевых транзисторах с затвором Шоттки (ПТШ) [1]. Известно, что при воздействии помех на радиоэлектронное устройство особенно уязвимы именно малошумящие усилители, так как они располагаются в радиотракте непосредственно после приемной антенны, и для обеспечения максимальной чувствительности на входе у них могут отсутствовать избирательные и защитные системы. При этом одним из основных поражающих факторов является воздействие на GaAs ПТШ электромагнитных помех, превышающих предельно допустимые значения.

Воздействующая на полупроводниковый прибор энергия электромагнитных помех вызывает нагрев активных областей полупроводникового кристалла. При определенных значениях воздействующей энергии рассеиваемая полупроводниковым прибором мощность оказывается критической. Так как нагрев кристалла приводит к диффузии атомов металла и полупроводника, то при критической температуре $T_в$ (температура вжигания) произойдет расплавление активной области структуры полупроводникового прибора. Поэтому разработка приборов, стойких к воздействию электромагнитных помех, и определение механизма отказа полупроводниковых приборов является актуальной задачей.

В настоящей работе проведен анализ изменений физической структуры разработанных нами арсенид-галлиевых малошумящих усилителей М421301 при воздействии электромагнитных помех повышенных интенсивностей с целью определения основных механизмов отказов.

Малошумящий усилитель М421301 работает в диапазоне частот 3÷8 ГГц. Усилитель построен на основе схемы двухкаскадного транзисторного усилителя с отрицательной обратной связью. Питание усилителя однополярное — 6 В. Коэффициент усиления в рабочем частотном диапазоне — более 16 дБ с неравномерностью менее 3 дБ и коэффициентом шума менее 2,5 дБ. Ток потребления схемы не превышает 60 мА.

Усилитель представляет собой квазимонолитную сборку, в которой на GaAs подложке сформированы пассивные компоненты — тонкопленочные резисторы, индуктивности и емкости, а активные элементы (транзисторы) установлены в схему методами поверхностного монтажа [1]. В качестве активных элементов использованы полевые транзисторы с барьером Шоттки на псевдоморфных гетероэпитаксиальных структурах с высокой подвижностью электронов (pHEMT) [2]. Гетероэпитаксиальная структура pHEMT представляет собой систему слоев AlGaAs/InGaAs/GaAs, выращенную на подложке полуизолирующего GaAs. В результате разницы в ширине запрещенной зоны контактируемых материалов в канале (слой InGaAs) у границы со спейсером (слой AlGaAs) формируется потенциальная яма — тонкий слой, в котором накапливаются свободные носители, образуя так называемый двумерный электронный газ (ДЭГ) [3]. Концентрация электронов проводимости в ДЭГ составляет величину до $2 \cdot 10^{12}$ см$^{-2}$ (300 K), а их подвижность — до 6500 см^2/(В·с) (300K). Базовая конструкция pHEMT транзистора представлена на рис.1.

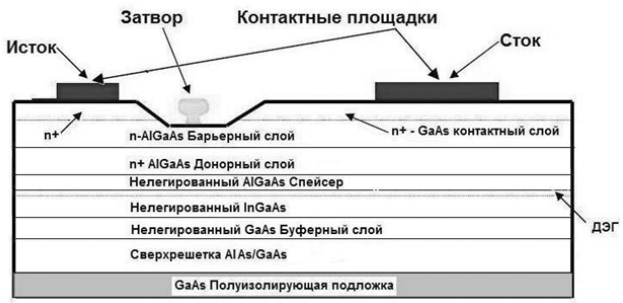


Рис.1. Базовая конструкция pHEMT транзистора

Углубление затвора в структуре транзистора сделано с целью уменьшения сопротивления истока.

Омические контакты сформированы с использованием «взрывной» фотолитографии. В качестве металлизации омических контактов выступает система слоев Ge-Au-Ni с последующим высокотемпературным вжиганием.

Т-образный затвор (Lg = 0,25÷0,35 мкм) формируется в результате последовательности операций осаждения нескольких диэлектрических слоев с последующим их травлением, получения субмикронной «щели», корректировки токов и напыления затворной металлизации V-Mo-Au [4].

Исполнение затворной металлизации в виде гребенки позволяет уменьшить единичную ширину затвора, и за счет этого — коэффициент шума. Топология транзистора (W = 300 мкм) представлена на рис.2.

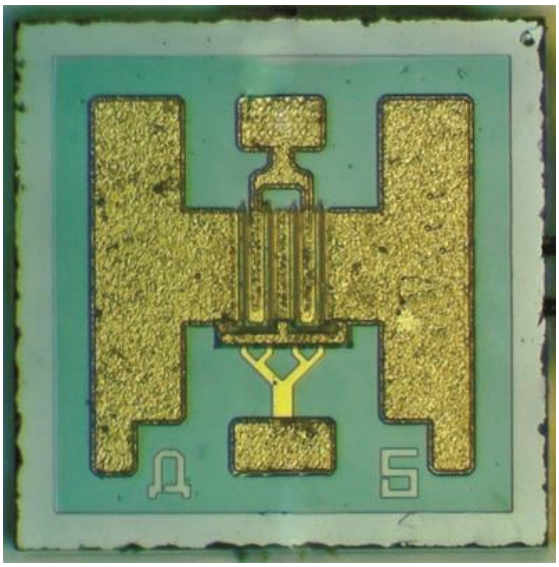


Рис.2. Топология транзистора с шириной затвора 300 мкм

Изготовленные по pHEMT технологии транзисторы имеют следующие характеристики: удельная крутизна 300 мА/(В·мм), удельный начальный ток стока 200мА/мм, напряжение отсечки 0,8…1,2 В.

Пассивная часть схемы реализована на отдельной плате, на которую затем были смонтированы транзисторы с шириной затвора 300 мкм.

Анализ изменения топологии и состояния поверхностей pHEMT транзисторов проведен методами атомно-силовой микроскопии [2] .

Воздействию высоких уровней непрерывной СВЧ мощности подвергались входные транзисторы усилительных модулей. Частота воздействия СВЧ мощности составляла 6 ГГц, а время воздействия — 1 минута.

Установлено, что при превышении мощности СВЧ сигнала 120 мВт наблюдается деградация СВЧ параметров усилительного модуля. При этом происходит снижение коэффициента усиления и рост шумов.

Методами атомно-силовой и оптической микроскопии обнаружено изменение физической структуры металлизации затвора входного транзистора усилителя (рис.3). Как видно из рис.3, наблюдается разрушение металлизации в первом и третьем сверху затворах.

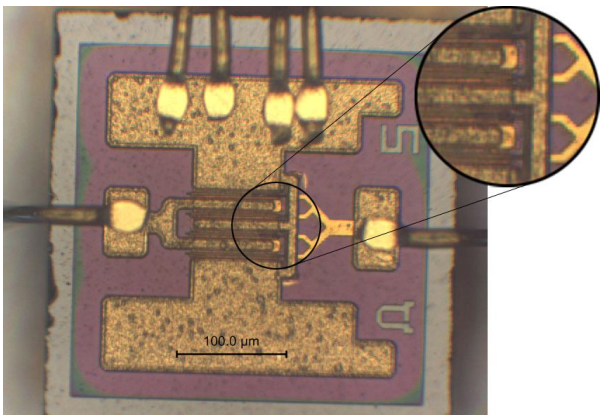


Рис.3. Разрушение металлизации в первом и третьем сверху затворах

Из методов сканирующих зондовой микроскопии были применены стандартный метод снятия топологии атомно-силовой микроскопии, методики фазового контраста, снятия латеральных сил, сопротивления растекания [2]. На рис.4-6 приведены характерные результаты, иллюстрирующие физическое изменение слоев металлизации при возникновении отказов.

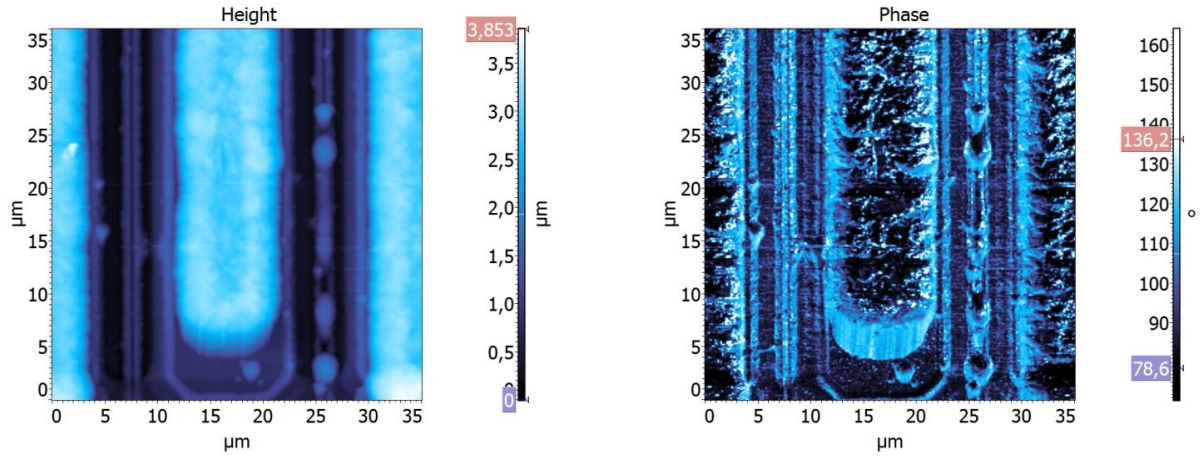


Рис.4. Изображение топографии транзистора и сдвига фазы колебаний кантилевера в полуконтактном режиме

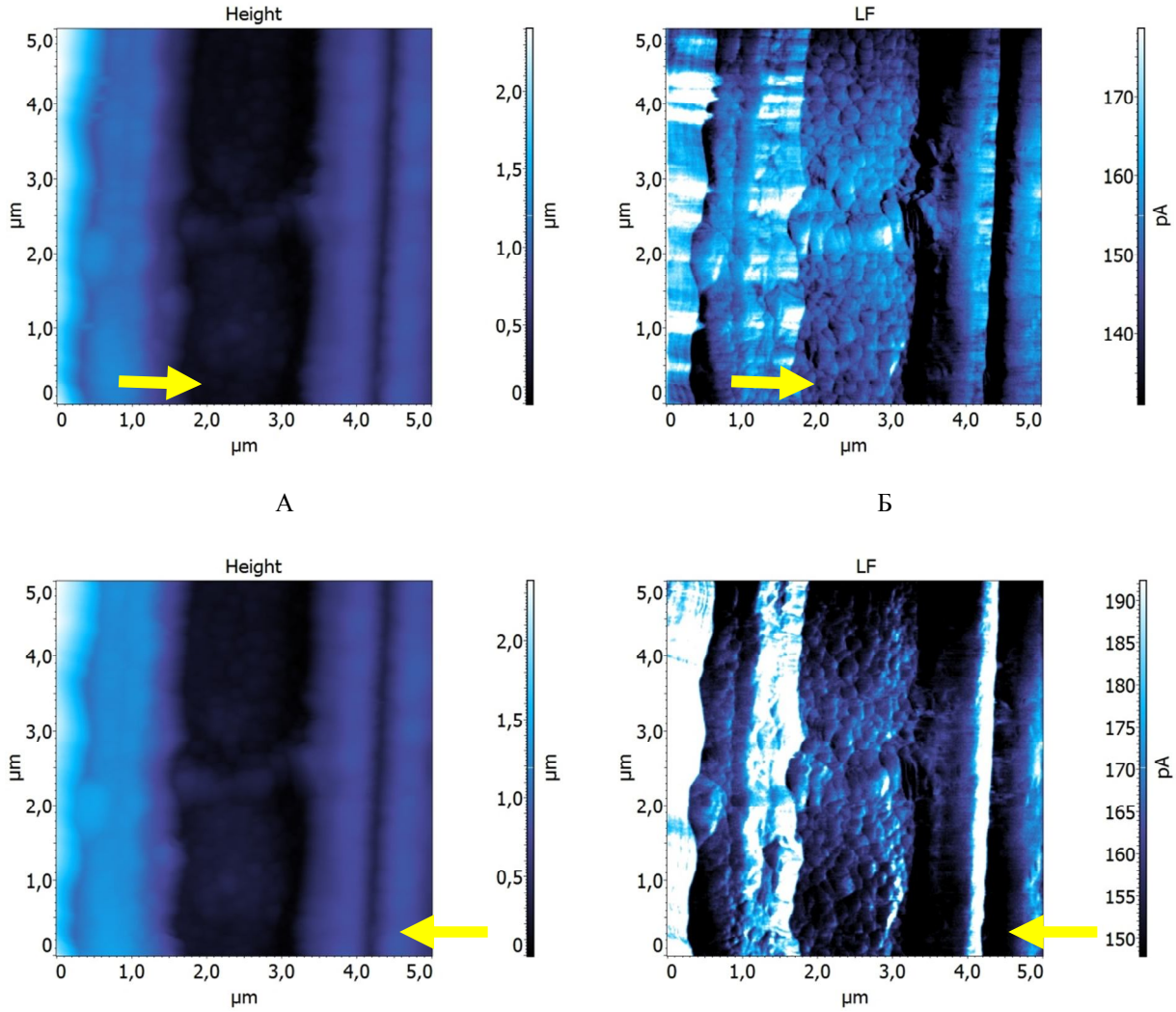
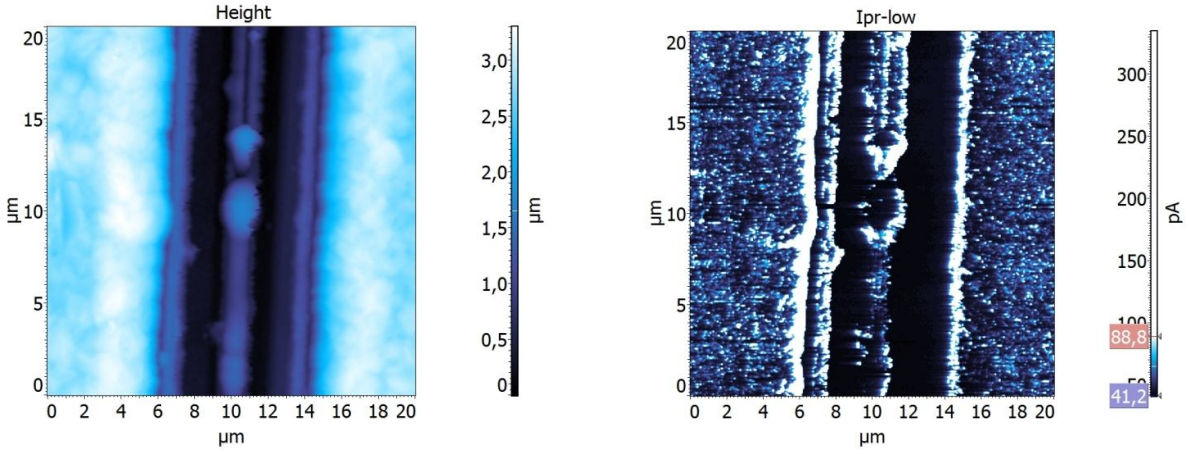


Рис.5. Изображения топографии и сигнала латеральных сил участка поверхности между истоком и затвором транзистора. А, Б — прямой проход зонда; В, Г — обратный проход; стрелками обозначено направление «быстрого» сканирования



А Б

Рис.6. Изображения затвора с расплавлением металлизации, полученные методом проводящей атомно-силовой микроскопии с отображением сопротивления растекания. А — изображение топографии, Б — изображение протекания тока

Изображения топографии поверхности транзистора и сдвига фазы колебаний кантилевера, представленные на рис.4, показывают ярко выраженные места разрушения металлизации затвора и прилегающих к нему областей, возникших в результате диффузии атомов металла и полупроводника.

Контактный метод с использованием латерально-силовой микроскопии позволил обнаружить на входном транзисторе малошумящего усилителя участок с деформацией поверхности предшествующий разрыву. Участок располагается на диэлектрической поверхности между областями затвора и истока транзистора. На рис.5 видно место шнурования тока. Расплавления металлизации на этом участке затвора не обнаружено.

Явно выраженных изменений топографии при регистрации сопротивления растекания по поверхности транзистора не обнаружено, что наглядно продемонстрировано на рис.6.

Интерпретация результатов, представленных на рис.4-6 в различных аналитических откликах, свидетельствует о перераспределении материалов в металлических слоях. При этом образующиеся разрывы и укрупненные металлические области округленной формы не противоречат предположению о процессах самосборки под воздействием деформационных сил в условиях стимулированного воздействия электромагнитной энергии. Для более точного описания механизмов изменения физической структуры металлизации требуются дальнейшие исследования.

1. Козловский Э.Ю., Селезнев Б.И., Дмитриев В.А., Штейнгарт А.П. Малошумящие СВЧ полевые транзисторы на арсениде галлия для систем связи // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2011. Вып.1,2. С.80-85.
2. Козловский Э.Ю., Спивак Ю.М., Мошников В.А., Пономарева А.А., Селезнев Б.И., Иванов Н.Н., Желаннов А.В. Транзисторные структуры типа pHEMT: исследование особенностей полупроводниковой гетероструктуры методами атомно-силовой микроскопии // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. 2010. Вып.1. С.18-29.
3. Мокеров В.Г. Гетероструктурная СВЧ электроника — новые перспективы наноэлектроники // Микросистемная техника. 2004. №10. С.13-15.
4. Селезнев Б.И., Романов В.Л., Мозгунов А.Ф., Швецов В.Н., Штейнгарт А.П. Формирование и исследование СВЧ полевых транзисторов на основе гетероструктур GaAs/GaAlAs/GaAs // Известия вузов. Электроника. 2003. Вып.2. С.32-39.

Bibliography (Transliterated)

1. Kozlovskij Je.Ju., Seleznev B.I., Dmitriev V.A., Shtejngart A.P. Maloshumjawie SVCh polevye tranzistory na arsenide gallija dlja sistem svjazi // Sistemy i sredstva svjazi, televidenija i radiovewanija. 2011. Vyp.1,2. S.80-85.
2. Kozlovskij Je.Ju., Spivak Ju.M., Moshnikov V.A., Ponomareva A.A., Seleznev B.I., Ivanov N.N., Zhelannov A.V. Tranzistornye struktury tipa pHEMT: issledovanie osobennostej poluprovodnikovoj geterostruktury metodami atomno-silovoj mikroskopii // Nauch.-tehn. vedomosti SPbGPU. 2010. Vyp.1. S.18-29.
3. Mokerov V.G. Geterostrukturnaja SVCh jelektronika — novye perspektivy nanojelektroniki // Mikrosistemnaja tehnika. 2004. №10. S.13-15.
4. Seleznev B.I., Romanov V.L., Mozgunov A.F., Shvecov V.N., Shtejngart A.P. Formirovanie i issledovanie SVCh polevyh tranzistorov na osnove geterostruktur GaAs/GaAlAs/GaAs // Izvestija vuzov. Jelektronika. 2003. Vyp.2. S.32-39.