

Технология изготовления взаимодополняющих транзисторов на нитриде галлия

А.Ю. Павлов, С.А. Гамкрелидзе, К.Н. Томош, Ю.В. Федоров, В.Ю. Павлов, Р.Р. Галиев, П.П. Мальцев

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, г. Москва, p.alex.ur@yandex.ru

Аннотация — В работе раскрыты основные методы формирования нормально закрытых транзисторов на гетероструктурах AlGaIn/GaN. Выделены ключевые недостатки и оценена возможность изготовления рассмотренными методами на одном кристалле транзисторов, работающих в режиме обогащения (Enhancement-mode НЕМТ) и обеднения (Depletion-mode НЕМТ). При выборе метода реализации транзисторов учитывались технологические возможности Института СВЧ полупроводниковой электроники РАН. Для реализации был выбран метод изготовления нормально закрытого транзистора с подзатворным заглублением с использованием способа низкоэнергетического бездефектного травления барьерного слоя AlGaIn. Использование подзатворного заглубления обеспечивает изготовление “системы-на-кристалле”, реализующей аналоговую и силовую части устройств. Процесс низкоэнергетического травления барьерного слоя гетероструктуры AlGaIn/GaN легко интегрируем в технологический маршрут изготовления приборов силовой и сверхвысокочастотной электроники, позволяя изготовить на одной пластине транзисторы, работающие как в режиме обеднения, так и транзисторы, работающие в режиме обогащения.

Ключевые слова — нормально закрытый транзистор, нитрид галлия, гетероструктура, режим обогащения, режим обеднения, барьерный слой, плазмохимическое травление, “система-на-кристалле”, мощность, сверхвысокочастотная полупроводниковая электроника.

I. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своим свойствам нитрид галлия (GaN) хорошо зарекомендовал себя как в силовой электронике, за счет большой ширины запрещенной зоны и высокой плотности основных носителей заряда в канале гетероструктуры, так и в сверхвысокочастотной (СВЧ) полупроводниковой электронике. Транзисторы с высокой подвижностью электронов на гетероструктуре AlGaIn/GaN (НЕМТ AlGaIn/GaN) имеют большой потенциал для современных микросхем, используемых для реализации современных технологий и технических решений в системах связи, радиолокации, передачи информации, расширяя возможности мощных высокочастотных приборов. Гетероструктуры AlGaIn/GaN обеспечивают работу НЕМТ AlGaIn/GaN в режиме обеднения (Depletion-mode НЕМТ, D-mode

НЕМТ), то есть на таких структурах формируется стандартный нормально открытый полевой транзистор. При формировании мощных усилителей на нитридных нормально закрытых транзисторах, обеспечивающих работу в режиме обогащения (Enhancement-mode НЕМТ, E-mode НЕМТ), обеспечивается более простая и безопасная работа микросхем [1]. Нормально закрытые и открытые транзисторы также могут быть использованы в логических схемах. Реализации D-mode НЕМТ и E-mode НЕМТ в одном технологическом цикле изготовления микросхемы и позволит создавать “системы-на-кристалле”, обеспечивающие одновременно силовую и малосигнальную части.

В Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники (ИСВЧПЭ) РАН поставлена задача обеспечения интеграции E-mode НЕМТ к изготовленному D-mode НЕМТ на имеющемся технологическом оборудовании для возможности изготовления нового класса приборов на нитриде галлия. По литературным данным наиболее распространенными методами получения нормально закрытых транзисторов на гетероструктуре AlGaIn/GaN являются имплантация фтора (F) в подзатворную область [1]-[3], использование заведомо тонких структур [4], [5], формирование под затвором области GaN p-типа [6]-[8], травление барьерного слоя AlGaIn под затвором [9]-[15].

II. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НОРМАЛЬНО ЗАКРЫТЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ ALGAN/GAN

A. Имплантация фтора в подзатворную область

Формирование нормально закрытых транзисторов с использованием имплантированной фтором области под затвором осуществляется за счет плазменной обработки поверхности барьерного слоя во фторсодержащей плазме перед нанесением затворной металлизации. При этом используется наиболее распространенный фторсодержащий газ - тетрафторид углерода (CF₄) и используется плазма с энергиями, достаточными для проникновения фтора в приповерхностную область гетероструктуры. Эффективность использования имплантации фтора в GaN обусловлена его сильной электроотрицательностью. При этом одиночные ионы

фтора в приповерхностном слое имеют тенденцию захватывать свободные электроны и становятся сильно отрицательно заряженными. Эти заряды модулируют локальный потенциал, который обедняет канал с двумерным электронным газом (2 DEG). Схематически изготовление нормально закрытого транзистора с имплантацией фтора в подзатворную область показано на рисунке 1.

Технология имплантации фтора в подзатворную область позволяет реализовать на одном кристалле аналоговую, силовую и цифровые части за счет изготовления D-mode HEMT и E-mode HEMT [2]. Однако при имплантации фтора в барьерный слой гетероструктуры происходит его частичное травление и внесение дополнительных радиационных дефектов, что сказывается на электрофизических характеристиках. Отмечается что данный эффект за счет использования плазмы в CF_4 с разной энергией позволяет получать заглубленный затвор в барьерный слой с имплантированным фтором под затворной металлизацией [3].

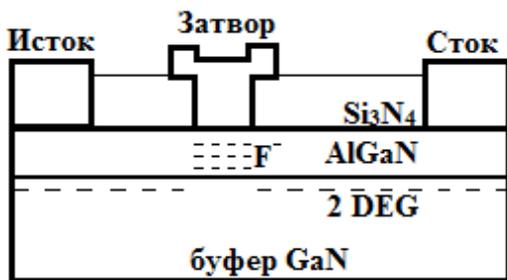


Рис. 1. Схематическое изображение нормально закрытого транзистора с имплантированной областью

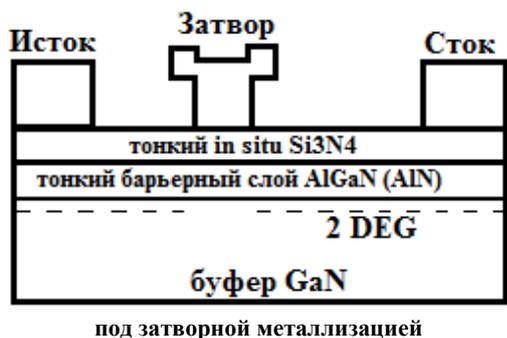


Рис. 2. Схематическое изображение нормально закрытого транзистора с тонким барьерным слоем под затворной металлизацией

В. Использование тонких гетероструктур

Использование заведомо тонких гетероструктур позволяет сформировать нормально закрытый транзистор за счет близости канала транзистора к затвору. В Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН разработана технология молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур $SiN/AlN/GaN$ со сверхтонким барьером, пассивированных в камере роста. Толщина сверхтонкого барьера составляла около 4-5 нм, что

позволило после постростового изготовления транзистора получить транзистор, работающий в режиме обогащения [5]. Схематически нормально закрытый транзистор на тонкой гетероструктуре показан на рис. 2. Таким образом, изготовление нормально закрытого транзистора определяется изготовлением конкретной структуры с тонким барьерным слоем, при росте которого необходимы компромиссные условия формирования верхней части AlN/GaN -гетероструктуры. На таких структурах реализация силовых и малосигнальных частей микросхемы не получится из-за отсутствия возможности изготовления на этих структурах нормально открытых транзисторов.

С. Использование p-GaN в подзатворной области

Использование структур с легированным магнием GaN (p -GaN/ $AlGaIn/GaN$) подразумевает селективное удаление слоя p -GaN перед формированием омических контактов. Схематически нормально закрытый транзистор с p -GaN областью под затвором показан на рис. 3. Пороговое напряжение отпирания транзистора с подзатворной областью на основе p -GaN определяется, главным образом, толщиной эпитаксиального слоя p -GaN и уровнем его легирования. Оптимизация данных параметров позволяет добиться порогового напряжения отпирания GaN-транзисторов, близкого к $V_{th} = +2V$. За счет использования МДП-структуры в составе p -GaN-транзистора происходит увеличение порогового напряжения отпирания до $V_{th} = +6.8V$ [8].

Д. Заглублением в барьерный слой (рецесс)

Наиболее распространенный и простой в реализации метод получения нормально закрытого транзистора на гетероструктуре $AlGaIn/GaN$ - использование подзатворного заглубления (рецесса) в барьерный слой $AlGaIn$ [9], [10]. Данная технология наиболее распространена в арсенид-галлиевой технологии за счет реализации рецесса жидкостным химическим травлением в растворах, при этом использование стопслоев позволяет бесконтрольно осуществлять процесс травления защитных слоев структур $GaAs/AlGaAs$ и обеспечивает необходимую однородность. В структурах $AlGaIn/GaN$ необходимо заглубиться в $AlGaIn$ без использования стопслоев. Химическим травлением в растворах данный процесс не реализуем из-за сильной химической связи азота с галлием. Поэтому используют так называемые «сухие» методы травления, с малыми энергиями заряженных частиц в хлорсодержащей среде. Обычно для реализации нормально закрытого транзистора с рецессом вначале формируют приборную изоляцию, омические контакты к гетероструктуре, затем через маску осуществляют плазмохимическое травление подзатворной канавки (рецесса). Изготовление транзистора завершается процессом литографии и напылением затворной металлизации Ni/Au . Схематически нормально закрытый транзистор с подзатворным заглублением показан на рис. 4. Для мощных транзисторов после рецесса осуществляют осаждение тонкого подзатворного диэлектрика за счет

осаждения пленок Al_2O_3 или Si_3N_4 методами плазмохимического или атомнослоевого осаждения (ALD). К преимуществам таких транзисторов можно отнести высокое пороговое напряжение отпираания, близкое к $V_{th} = +5\text{В}$.

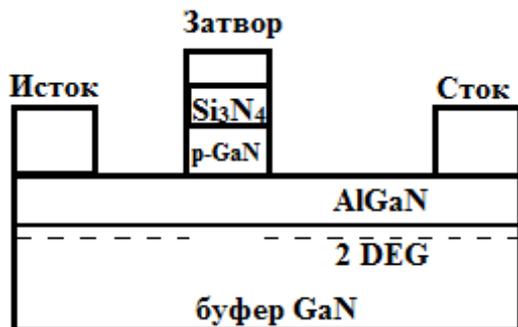


Рис. 3. Схематическое изображение нормально закрытого транзистора с р-GaN областью под затвором

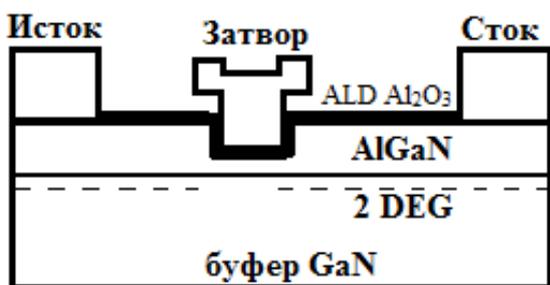


Рис. 4. Схематическое изображение нормально закрытого транзистора с использованием подзатворного заглабления

Также встречаются работы, в которых совмещают методы получения нормально закрытых транзисторов на GaN. В частности, проводят формирование подзатворной канавки в хлорсодержащей среде с последующей обработкой во фторсодержащей плазме, формируя область имплантированную фтором под затвором. Это позволяет уменьшить токи утечки «затвор-сток» и улучшить надежность и эффективность таких транзисторов [11].

При изготовлении нормально-закрытых транзисторов с подзатворным заглаблением на GaN происходит плазмохимическое воздействие на барьерный слой ионов разной энергии и происходит образование радиационных дефектов. При уменьшении толщины барьерного слоя до единиц нанометров возникающие дефекты в приповерхностной области влияют на электрофизические свойства гетероструктуры, что в конечном итоге сказывается на параметрах СВЧ транзисторов и их надежности. Для уменьшения этих эффектов при формировании подзатворной канавки разрабатываются методы «цифрового» травления барьерного слоя AlGaN гетероструктуры.

III. «ЦИФРОВОЕ» ТРАВЛЕНИЕ БАРЬЕРНОГО СЛОЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ALGAN

«Цифровое» травление [12] подразумевает двухстадийный процесс травления: окисление полупроводника и снятие его окисла. За один цикл такого травления снимается конкретная толщина для достижения контролируемой толщины. Для гетероструктуры AlGaN/GaN для окисления используется кислородная среда, а для снятия окисленного барьерного слоя AlGaN - хлорсодержащая среда. Такое последовательное удаление окисленных слоев обеспечивает заглабление со скоростью 1,5-2,5 нм за цикл. Идея метода двухстадийного плазмохимического травления для GaN транзисторов, работающих в режиме обогащения, запатентована лабораторией Hrl и подробно описана в работе [12]. В этой же работе показано сравнение нормально закрытых транзисторов, изготовленных с подзатворным заглаблением «цифровым» травлением, с транзисторами, изготовленными с имплантацией фтора в подзатворную область. Для одних и тех же конструкций гетероструктур транзисторы, изготовленные с использованием «цифрового» травления (рис. 4) имели крутизну (g_m) порядка 250 мСм/мм, что на 67 % больше, чем для транзисторов, изготовленных с имплантацией фтором (рис. 1). Пороговое изменение напряжения для транзисторов с «цифровым» травлением в два раза больше, чем для транзисторов с имплантацией фтора. А напряжение пробоя для транзисторов с таким рецессом оказалось более 1000 В.

Для осуществления процесса «цифрового» травления AlGaN формируется жесткая маска из диэлектрической пленки, через которую осуществляется окисление и последующее снятие окисленного слоя AlGaN. После выполнения необходимого количества циклов снимается пленка диэлектрика, осаждается тонкая пленка пассивирующего диэлектрика и формируется затвор транзистора. Для окисления и травления окислов использовалась установка с источником высокочастотной (ВЧ) мощности, реализующая метод реактивного ионного травления. При проведении процессов использовалась плазма с малыми ВЧ мощностями, что оказалось эффективно при удалении окислов. Замена химически активного хлора на трихлорид бора позволила улучшить селективность при удалении окисла. Воспроизводимость процесса подтверждается линейной зависимостью высоты формируемой ступеньки от количества проведенных циклов «цифрового травления». Но из-за использования режимов реактивного ионного травления в плазме присутствуют высокоэнергетичные ионы, которые приводят к образованию радиационных дефектов и частичному травлению за счет физической составляющей самого барьера AlGaN при удалении окисла.

Из-за возникновения радиационных дефектов при травлении барьерных слоев и его окислов в последних

работах по «цифровому» травлению AlGaN начали отказываться от «сухих» методов и окислы удаляют жидкостным химическим травлением в растворах соляной кислоты [13], [14]. Но использование жидкостных методов снятия окислов при «цифровом» травлении из-за маленькой скорости (около 0,5 нм за цикл) позволяет работать только с тонкими барьерными слоями. Сам технологический процесс при этом является весьма трудоёмким из-за необходимости использования нескольких установок для проведения одного цикла травления.

Для реализации «цифрового» травления «сухим» способом в ИСВЧПЭ РАН было разработано бездефектное низкоэнергетичное травление барьерного слоя AlGaN, позволяющее снимать окисленный слой без образования радиационных дефектов [15]. Предложенная технология позволяет реализовать D-mode NEMT и E-mode NEMT в одном технологическом цикле изготовления микросхемы. Выходные характеристики изготовленных нитридных транзисторов на подложке сапфира приведены на рис. 5.

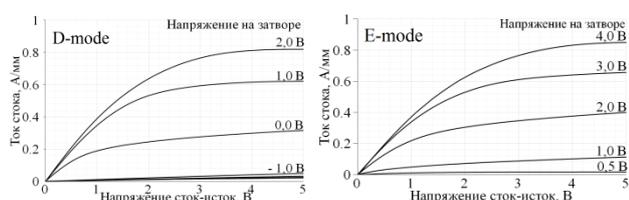


Рис. 5. Выходные характеристики транзисторов, работающих в режиме обеднения (D-mode) и режиме обогащения (E-mode)

IV. БЕЗДЕФЕКТНОЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОЕ ТРАВЛЕНИЕ БАРЬЕРНОГО СЛОЯ ALGAN

Для реализации «цифрового» травления использовалась установка с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП). Одно из главных преимуществ использования ИСП – это травление низкоэнергетичными ионами большой плотности. При этом использовался один реактор для операций окисления и химического травления окисленного слоя, что позволило автоматизировать процесс за счет использования программного обеспечения установки. Использование источника ИСП позволяет получить плазму с высокой плотностью и малыми энергиями заряженных частиц, взаимодействующими с поверхностью образца, что позволяет избежать возникновения радиационных дефектов в приповерхностных слоях гетероструктуры. Помимо этого, большая концентрация заряженных частиц в реакторе во время плазмохимических процессов обеспечивает высокую скорость и качество травления. В процессах окисления и травления окисленного слоя источник ИСП использовался совместно с высокочастотным (ВЧ) электродом, что обеспечило режим реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме (РИТ-ИСП), позволяющий менять и контролировать напряжение смещения на ВЧ электроде. Образец, подвергаемый плазмохимической

обработке, располагался на ВЧ электроде, напряжение смещения на котором определяло энергию заряженных частиц, взаимодействующих с образцом. Предыдущие исследования показали [16], что для минимизации дефектообразования при проведении процессов травления диэлектриков и полупроводников напряжение смещения на ВЧ электроде не должно превышать 40 В. Однако, как отмечается в работе [17], снятие оксидной пленки с поверхности нитридной гетероструктуры перед формированием омических контактов с использованием РИТ-ИСП при напряжении смещения на ВЧ электроде менее 20 В, по-видимому, не позволяет полностью удалить образованную в процессе плазмохимической обработки поверхности GaN ионами из плазмы BCl_3 «паразитную» пленку B_xCl_y , что, в свою очередь, препятствует полному удалению с поверхности гетероструктуры оксидного слоя. Поэтому травление оксидной пленки проводилось при смещениях на ВЧ электроде в диапазоне от 20 до 40 В, и при мощности ИСП источника - 100 Вт, мощность ВЧ генератора – 10 Вт при давлении BCl_3 в камере порядка 1 Па и потоке газа 10 ссм напряжение смещения на ВЧ электроде составляло 25 В. Использование малого смещения, плазмы высокой плотности и менее химически активного трихлорида бора обеспечило бездефектное селективное удаление оксидной пленки. Селективность была подтверждена отсутствием следов травления AlGaN при длительном воздействии РИТ-ИСП через диэлектрическую маску. Удаление окисленного барьерного слоя за один цикл окисления и снятия окисла обеспечило скорость 1,5 нм за цикл.

Представленная технология травления барьерного слоя была использована при изготовлении AlGaN/AlN/GaN/ Al_2O_3 NEMT на одной пластине, работающих в режиме обогащения и обеднения. Зависимости для удельных крутизны и тока стока от напряжения на затворе представлены на рис. 6. Для D-mode NEMT напряжение отсечки -1.3 В, а для E-mode NEMT напряжение отпириания 0,5 В.

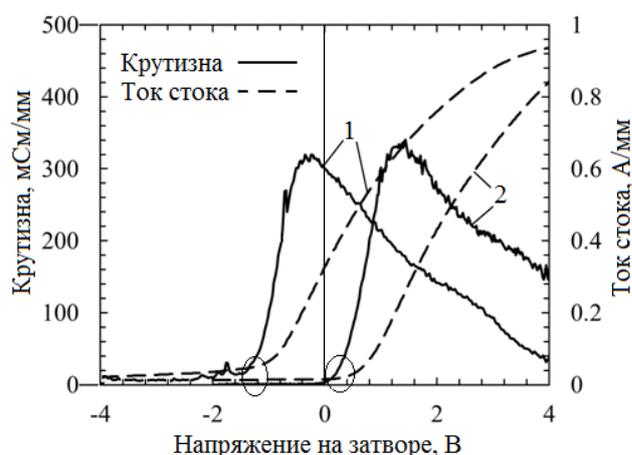


Рис. 6. Зависимость удельных крутизны и тока стока от напряжения на затворе для транзисторов, работающих в режиме обеднения (1) и обогащения (2)

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее подходящим методом реализации нормально закрытых транзисторов в едином технологическом цикле с нормально открытыми транзисторами в ИСВЧПЭ РАН является формирование подзатворного заглабления. Формирование подзатворного заглабления с использованием «цифрового» травлением барьерного слоя AlGa_N в плазме высокой плотности за счет циклического процесса окисления барьерного слоя и снятия окисла в хлорсодержащей среде в реакторе одной установки. Использование низкоэнергетичного травления барьерного слоя позволяет бездефектно, селективно, воспроизводимо и легко контролируемо удалять барьерный слой, обеспечивая при этом сглаживание рельефа структуры. Данный процесс легко интегрируем в технологический цикл изготовления микросхем на нитриде галлия, и позволяет реализовать «системы-на-кристалле» построенные на транзисторах, работающих в режиме обогащения (Enhancement-mode HEMT) и обеднения (Depletion-mode HEMT).

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-01426 А.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tang Z., Jiang Q., Lu Y., Huang S., Yang S., Tang X., and Chen K. J. 600-V normally off SiN_x/AlGa_N/Ga_N MIS-HEMT with large gate swing and low current collapse // *IEEE Electron Device Lett.* 2013. V. 34. № 11, P. 1373–1375.
- [2] Chen K.J., Kwan A.M.H., Jiang Q. Technology for III-N heterogeneous mixed-signal electronics // *Physica Status Solidi A.* 2014. V.211 № 4 P. 769-774.
- [3] Liu C., Yang S., Liu S., Tang Z., Wang H., Jiang Q., Chen K.J. Thermally stable enhancementmode Ga_N metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistor with partially recessed fluorine-implanted barrier // *IEEE Electron Device Lett.* 2015. V. 36. № 4. P. 318-320.
- [4] Brown R., Macfarlane D., Al-Khalidi A., Li X., Ternent G., Zhou H., Thayne I., and Wasige E. A sub-critical barrier thickness normally-off AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT // *IEEE Electron Device Lett.* 2014. V. 35. № 9. P. 906-908.
- [5] Журавлев К.С., Малин Т.В., Мансуров В.Г., Терещенко О.Е., Абгарян К.К., Ревизников Д.Л., Земляков В.Е., Егоркин В.И., Парнес Я.М., Тихомиров В.Г., Просвирин И.П. AlN/GaN-гетероструктуры для нормально закрытых транзисторов // *ФТП.* 2017. Т. 51. №. 3. С. 395-402.
- [6] Meneghini M., Hilt O., Wuerfl J., and Meneghesso G. Technology and reliability of normally-off Ga_N HEMTs with p-type Gate // *Energies.* 2017. V. 10. № 2. 153
- [7] Wang H., Wei J., Xie R., Liu C., Tang G., and Chen K. J. Maximizing the performance of 650-V p-GaN gate HEMTs: dynamic R_{ON} degradation and circuit design considerations // *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2017. V. 32. № 7. P. 5539-5549.
- [8] Ерофеев Е.В., Федин И.В., Федина В.В., Степаненко М.В., Юрьева А.В. Мощный GaN-транзисторы с подзатворной областью на основе МДП-структур // *ФТП.* 2017. Т 51. № 9. С.1278-1281.
- [9] Lanford W. B., Tanaka T., Otoki Y., and Adesida I. Recessed-gate enhancement-mode Ga_N HEMT with high threshold voltage // *Electronics Lett.* 2005. V. 41. № 7. P. - 449-450.
- [10] Saito W., Takada Y., Kuraguchi M., Tsuda K., and Omura I. Recessed-gate structure approach toward normally off high-voltage AlGa_N/Ga_N HEMT for power electronics applications // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2006. V. 53. № 2. P. 356-362.
- [11] Lin J.-H., Huang S.-J., Lai C.-H., and Su Y.-K. Normally-off AlGa_N/Ga_N high-electron-mobility transistor on Si(111) by recessed gate and fluorine plasma treatment // *Japanese Journal of Applied Physics.* 2016. V. 55. № 1S. P. 01AD05.
- [12] Burnham S. D., Boutros K., Hashimoto P., Butler C., Wong D.W.S., Hu M., and Micovic M. Gate-recessed normally-off Ga_N-on-Si HEMT using a new O₂-BCl₃ digital etching technique // *Physica Status Solidi C.* 2010. V. 7. № 7–8. P.2010-2012.
- [13] Yamanaka R., Kanazawa T., Yagyu E., and Miyamoto Y. Normally-off AlGa_N/Ga_N high-electron-mobility transistor using digital etching technique // *Japanese Journal of Applied Physics.* 2015. V. 54. № 6. P. 06FG04.
- [14] Chakroun A., Jaouad A., Bouchilaoun M., Arenas O., Soltani A., and Maher H. Normally-off AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT using ultra-thin Al_{0.45}Ga_{0.55}N barrier layer // *Physica Status Solidi A.* 2017. V. 214. № 11. P. 1600836.
- [15] Михайлович С.В., Павлов А.Ю., Томош К.Н., Федоров Ю.В. Низкоэнергетическое бездефектное сухое травление барьерного слоя HEMT AlGa_N/AlN/GaN // *Письма в ЖТФ.* 2018. Т. 44. В. 10. С. 61-67.
- [16] Томош К.Н., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Хабибуллин Р.А., Арутюнян С.С., Мальцев П.П. Исследование процессов изготовления HEMT AlGa_N/AlN/GaN с пассивацией Si₃N₄ in situ // *ФТП.* 2016. Т. 50. №. 10. С. 1434–1438.
- [17] Андрианов Н.А., Кобелев А.А., Смирнов А.С., Барсуков Ю.В., Жуков Ю.М. Влияние обработки поверхности в ВCl₃ плазме на формирование омических контактов к структурам AlGa_N/Ga_N // *ЖТФ.* 2017. Т. 87. №. 3. С. 413–418.

The Technology of Manufacturing of Complementary Transistors on Gallium Nitride

A.Yu. Pavlov, S.A. Gamkrelidze, K.N. Tomosh, Yu.V. Fedorov, V.Yu. Pavlov, R.R. Galiev, P.P. Maltsev

Institute for Ultra High Frequency Semiconductor Electronic of RAS, Moscow, p.alex.ur@yandex.ru

Abstract — The need to fabricate normally-off transistors that provide operation in the enhancement mode is confirmed by publications for last 3-4 years. The use of normally-off transistors in power electronics provides for a more simple and safe operation of microcircuits. Manufacture of power and analog part on one chip will expand the electronic component base. For manufacturing of a normally-off field-effect transistor based on the AlGaIn/GaN heterostructures, it is proposed to form gate recess by low-energy plasma-chemical etching of the AlGaIn barrier layer in high-density plasma with an inductively coupled plasma source. Etching is due to cyclic oxidation of the barrier layer with subsequent chemical removal of the oxidized layer in the chlorine-containing environment. The proposed method allows controllable etching of the AlGaIn layers with a rate of 1.5 nm/cycle without defect formation. Inductively coupled plasma makes it possible to obtain plasma with high density and low energies of charged particles interacting with the sample surface. This eliminates the occurrence of radiation defects in the near-surface layers of the heterostructure. The high concentration of charged particles in the reactor during the plasmochemical processes ensures high homogeneity and quality of etching. Reducing the thickness of the barrier layer of the heterostructure due to dry etching and the gate metallization ensures the operation of the transistor in the enhancement mode. The use of dry low-energy plasma-chemical etching in the technological cycle of manufacturing microcircuits allows one to fabricate transistors operating in the regime of enhancement and depletion.

Keywords — normally-off transistor, gallium nitride, heterostructure, enhancement mode, depletion mode, barrier layer, plasma-chemical etching, a system on a crystal, power, microwave-high-power semiconductor electronics.

SUPPORT

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-07-01426 A.

REFERENCES

- [1] Tang Z., Jiang Q., Lu Y., Huang S., Yang S., Tang X., and Chen K. J. 600-V normally off $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ MIS-HEMT with large gate swing and low current collapse // *IEEE Electron Device Lett.* 2013. V. 34. № 11, P. 1373–1375.
- [2] Chen K.J., Kwan A.M.H., Jiang Q. Technology for III-N heterogeneous mixed-signal electronics // *Physica Status Solidi A.* 2014. V.211 № 4 P. 769-774.
- [3] Liu C., Yang S., Liu S., Tang Z., Wang H., Jiang Q., Chen K.J. Thermally stable enhancementmode GaN metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistor with partially recessed fluorine-implanted barrier // *IEEE Electron Device Lett.* 2015. V. 36. № 4. P. 318-320.
- [4] Brown R., Macfarlane D., Al-Khalidi A., Li X., Ternent G., Zhou H., Thayne I. and Wasige E. A sub-critical barrier thickness normally-off AlGaIn/GaN MOS-HEMT // *IEEE Electron Device Lett.* 2014. V. 35. № 9. P. 906-908.
- [5] Zhuravlev K.S., Malin T.V., Mansurov V.G., Tereshenko O.E., Abgaryan K.K., Reviznikov D.L., Zemlyakov V.E., Egorkin V.I., Parnes Y.M., Tikhomirov V.G., Prosvirin I.P. AlN/GaN heterostructures for normally-off transistors // *Semiconductors.* 2017. V. 51. №. 3. P. 395-402. (in Russian)
- [6] Meneghini M., Hilt O., Wuerfl J. and Meneghesso G. Technology and reliability of normally-off GaN HEMTs with p-type Gate // *Energies.* 2017. V. 10. № 2. 153
- [7] Wang H., Wei J., Xie R., Liu C., Tang G. and Chen K. J. Maximizing the performance of 650-V p-GaN gate HEMTs: dynamic R_{ON} degradation and circuit design considerations // *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2017. V. 32. № 7. P. 5539-5549.
- [8] Erofeev E.V., Fedin I.V., Fedina V.V., Stepanenko M.V., Yuryeva A.V. High-voltage MIS-gate transistors // *Semiconductors.* 2017. V 51. № 9. P. 1278-1281. (in Russian)
- [9] Lanford W. B., Tanaka T., Otoki Y. and Adesida I. Recessed-gate enhancement-mode GaN HEMT with high threshold voltage // *Electronics Lett.* 2005. V. 41. № 7. P. -449-450.
- [10] Recessed-gate structure approach toward normally off high-voltage AlGaIn/GaN HEMT for power electronics applications // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2006. V. 53. № 2. P. 356-362.
- [11] Lin J.-H., Huang S.-J., Lai C.-H. and Su Y.-K. Normally-off AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistor on Si(111) by recessed gate and fluorine plasma treatment // *Japanese Journal of Applied Physics.* 2016. V. 55. № 1S. P. 01AD05.
- [12] Burnham S. D., Boutros K., Hashimoto P., Butler C., Wong D.W.S., Hu M. and Micovic M. Gate-recessed normally-off GaN-on-Si HEMT using a new $\text{O}_2\text{-BCl}_3$ digital etching technique // *Physica Status Solidi C.* 2010. V. 7. № 7–8. P.2010-2012.
- [13] Yamanaka R., Kanazawa T., Yagyu E. and Miyamoto Y. Normally-off AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistor using digital etching technique // *Japanese Journal of Applied Physics.* 2015. V. 54. № 6. P. 06FG04.
- [14] Chakroun A., Jaouad A., Bouchilaou M., Arenas O., Soltani A. and Maher H. Normally-off AlGaIn/GaN MOS-HEMT using ultra-thin $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ barrier layer // *Physica Status Solidi A.* 2017. V. 214. № 11. P. 1600836.
- [15] Mikhailovich S.V., Pavlov A.Y., Tomosh K.N., Fedorov Y.V. Low-energy defect-free dry etching of the barrier layer AlGaIn/AlN/GaN HEMT // *Technical Physics Lett.* 2018. V. 44. №. 10. P. 61-67. (in Russian)
- [16] Tomosh K.N., Pavlov A.Y., Pavlov V.Y., Khabibullin R.A., Arutyunyan S.S., Maltsev P.P. Investigation of the fabrication processes of AlGaIn/AlN/GaN HEMTs with in situ Si_3N_4 passivation // *Semiconductors.* 2016. V. 50. №. 10. P. 1434–1438. (in Russian)
- [17] Andrianov N.A., Kobelev A.A., Smirnov A.S., Barsukov Y.V., Zhukov Y.M. Influence of surface processing in a BCl_3 plasma on the formation of ohmic contacts to AlGaIn/GaN structures // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics.* 2017. V. 87. №. 3. P. 413–418. (in Russian)