

Исследование процессов изготовления HEMT AlGaN/AlN/GaN с пассивацией Si₃N₄ *in situ*

© К.Н. Томаш, А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, Р.А. Хабибуллин, С.С. Арутюнян, П.П. Мальцев

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук,
117105 Москва, Россия

E-mail: sky77781@mail.ru

(Получена 7 апреля 2016 г. Принята к печати 12 апреля 2016 г.)

В работе подобран оптимальный режим плазмохимического травления в среде C₃F₈/O₂ пассивирующего слоя Si₃N₄ *in situ* при изготовлении HEMT AlGaN/AlN/GaN. Установлено, что напряжение смещения на высокочастотном электроде 40–50 В обеспечивает анизотропное травление диэлектрика через резистивную маску и не вносит заметных радиационных дефектов при перетраве пленок диэлектрика в области формирования затворной металлизации. Для оценки влияния роста Si₃N₄ *in situ* вместе с гетероструктурой в одном процессе на характеристики HEMT AlGaN/AlN/GaN были изготовленные транзисторы с затворами без диэлектрика и с затворами через щели в Si₃N₄. Показано, что при наличии Si₃N₄ максимальный ток стока HEMT AlGaN/AlN/GaN при 0 В на затворе в 1.5 раза выше, чем без Si₃N₄.

1. Введение

Растущий интерес к гетероструктурам AlGaN/GaN и приборам на их основе определяется их свойствами. Благодаря высоким значениям подвижности и концентрации носителей заряда двумерного электронного газа (2DEG), формируемого у гетерограницы AlGaN/GaN, ток насыщения такой структуры велик, а благодаря большой ширине запрещенной зоны материала велика и выходная мощность устройств на основе AlGaN/GaN-приборов [1]. Необходимость создания электронной компонентной базы на данных типах структур ставит задачи как по улучшению технологий создания приборов на таких структурах, так и самих структур. Использование операции пассивации *in situ*, которую проводят одновременно с процессом роста эпитаксиальных слоев AlGaN/GaN, выгодно с точки зрения уменьшения концентрации ловушек электронов, получения требуемых рабочих характеристик и повышения надежности приборов [1].

В работах по росту гетероструктур с пассивирующим слоем Si₃N₄ показано влияние формирования слоя *in situ* на транспортные свойства гетероструктур и их высокую термостабильность при температурах > 800°C [2]. Отмечено увеличение концентрации электронов проводимости из-за нейтрализации заряда на поверхности за счет пассивации, количества дефектов и шероховатости поверхности AlGaN, и при этом Si₃N₄ выполняет роль защитного слоя поверхности HEMT (high electron mobility transistor) [3,4].

Сравнение пассивации Si₃N₄ *in situ* с постростовой плазмохимической пассивацией из газовой фазы (*ex situ*) показало перспективность пассивации *in situ* в процессе роста для приборной реализации. Пассивация *in situ* позволила уменьшить коллапс тока и повысить термостабильность HEMT на гетероструктурах [5], уменьшить токи утечки по поверхности, что позволило создавать приборы с высокими рабочими напряжениями и выход-

ными мощностями [6–8]. Таким образом, использование структур Si₃N₄/Al_{1-x}Ga_xN/GaN позволило создавать мощные приборы, работающие в большом диапазоне температур. При этом сформированный *in situ* Si₃N₄ может служить подзатворным диэлектриком [9,10].

В нашей работе стояла задача удаления пассивирующего диэлектрика в области формирования затворной металлизации с наименьшим количеством радиационных дефектов в барьерном слое гетероструктуры, образующихся за счет ионной бомбардировки, для последующего изготовления транзисторов без изолированного затвора. Для создания высокочастотного транзистора необходимо уменьшать длину ножки затвора [11]. Для этого необходимо травить *in situ* Si₃N₄ через маску с размерами меньше 15 нм. Из-за наличия капиллярных эффектов при таких размерах жидкостное травление неприемлемо. Также существуют проблемы с вымыванием из окон травителя и большим подтравом под резистивную маску из-за изотропного характера травления. Поэтому был выбран метод сухого травления диэлектрического пассивирующего слоя — плазмохимическое травление в реакторе с индуктивно-связанной плазмой (ИСП) [12].

Высокая концентрация электронов и ионов в ИСП является одним из ее главных преимуществ при плазмохимическом травлении, поскольку обеспечивает высокую скорость и качество травления. Индукционная катушка находится вне рабочей камеры, поэтому она не взаимодействует с плазмой, не разрушается агрессивными компонентами плазмы и не загрязняет плазму продуктами этого воздействия.

Плазмообразующая смесь газов в реакторе в первую очередь должна обеспечивать приемлемую скорость травления диэлектрика, селективность по отношению к резистивной маске и анизотропию. Для травления кремния и его соединений используют фторсодержащие газы. Чаще всего используют хладоны — углеродные галогенсодержащие соединения. Общие недостатки этой группы

газов — возможность образования токсичных продуктов в процессе травления, склонность к полимеризации, возможность образования элементарного углерода на обрабатываемой поверхности (для простых хладонов). Для подавления двух последних эффектов в рабочий газ часто добавляют кислород [13,14]. Из других фторсодержащих газов следует отметить гексафторид серы SF₆, применение которого позволяет достичь высоких скоростей травления без осаждения на поверхности твердых продуктов разложения исходного газа. Чистый фтор практически не применяется из-за своей высокой химической активности по отношению к конструкционным материалам технологического оборудования и токсичности.

Целью работы является подбор режимов травления и оценка влияния пассивации Si₃N₄ in situ на параметры HEMT AlGaN/AlN/GaN.

2. Экспериментальные методики и образцы

Для изготовления HEMT использовались гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN, барьерный слой в которых состоит из AlN толщиной 1 нм и Al_{0.4}Ga_{0.6}N толщиной 10 нм, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках сапфира (0001). Осаждение пассивирующего слоя Si₃N₄ толщиной 30 нм проводилось после роста структуры непосредственно в ростовой камере установки МЛЭ. Для создания молекулярного потока кремния на подложку была использована эффузионная ячейка Кнудсена.

Маршрут изготовления HEMT AlGaN/AlN/GaN включает в себя межприборную изоляцию, реализуемую плазмохимическим травлением последовательно Si₃N₄ in situ в смеси газов SF₆/O₂ и нитридной гетероструктуры в смеси BCl₃/Ar через предварительно сформированную резистную маску с последующим напылением контактной металлизации Ti/Ni/Au и быстрым термическим отжигом в среде N₂. Данная технология позволяет получить омические контакты с сопротивлением 0.45 Ом · мм.

Формирование затвора HEMT AlGaN/AlN/GaN проходит в два этапа: создание щели в Si₃N₄ и затем формирование профиля затвора с последующим напылением слоев затворной металлизации (Ni/Au). В результате получаемые HEMT AlGaN/AlN/GaN не требуют пассивации активной области между омическими контактами (рис. 1).

Формирование такого затвора ставит задачу минимального растрыва через резистную маску и при дотраве до активной области гетероструктуры внесение минимального количества радиационных дефектов, связанных с ионной бомбардировкой при перетраве Si₃N₄. Использование гексафторида серы при травлении Si₃N₄ в разных режимах приводит к увеличению первоначального

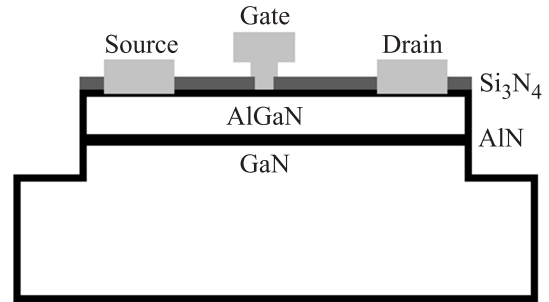


Рис. 1. Схематическое изображение HEMT AlGaN/AlN/GaN с пассивацией Si₃N₄ in situ.

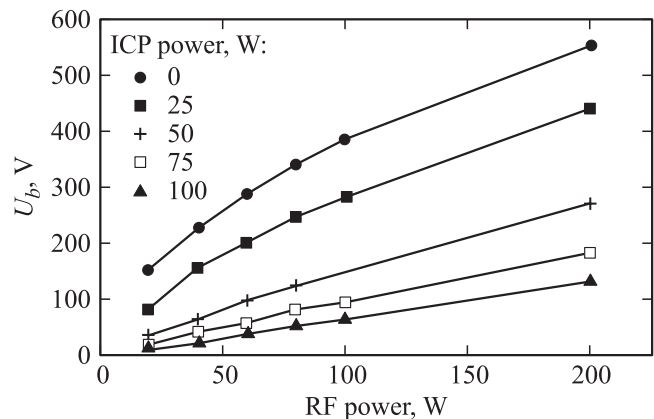


Рис. 2. Зависимость напряжения смещения U_b от ВЧ (RF) мощности и мощности ИСП (ICP).

размера в резистной маске в 2–2.5 раза. Использование хладонов, склонных к полимеризации, позволило получать меньшие размеры при наличии смещения на подложке за счет полимеризации боковых стенок в процессе травления щелей в Si₃N₄. Таким образом, помимо травления ИСП использовали комбинацию с высокочастотным (ВЧ) травлением, обеспечивающим потенциал на подложке и удаление полимера на горизонтальных поверхностях образцов.

Основной задачей работы было определение влияния режимов травления на свойства гетероструктуры, так как электрофизические свойства полупроводников (концентрация и подвижность электронов в канале) зависят от появления дополнительных центров рассеяния, возникающих при образовании радиационных дефектов. При плазмохимических процессах, связанных с травлением диэлектриков, происходят в разной степени перетравы диэлектрических пленок, что приводит к воздействию фторидной плазмы на поверхность гетероструктуры. GaN-HEMT при таких перетравах более стоек к дефектообразованию, чем HEMT на основе GaAs, что показано при намеренном перетраве в среде гексафторида серы (SF₆) при реактивном ионном травлении с мощностью 60 Вт [15]. Для оценки влияния наших режимов с разными напряжениями смещения на нижнем ВЧ электроде были использованы гетероструктуры

AlGaAs/InGaAs/GaAs с толщиной барьера 22 нм: мы основывались на том, что незначительное изменение электрофизических параметров данных гетероструктур свидетельствует о бездефектном травлении гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs. При анализе природы радиационных дефектов приходится полагаться в основном на результаты косвенных методов, таких как спектроскопия фотолюминесценции и измерение эффекта Холла [16].

Травление проводилось с использованием установки Sentech SI 500, имеющей источник индуктивно связанной плазмы PTSA 200. Так как энергия ионов определяется напряжением смещения, то в работе было исследовано изменение электрофизических параметров гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs в зависимости от напряжения смещения, возникающее при травлении диэлектрических пленок в смеси хлада 218 (C_3F_8) с кислородом (O_2) при разных значениях мощности ВЧ. С увеличением мощности ВЧ увеличивается напряжение смещения, а с увеличением мощности ИСП смещение падает (рис. 2).

3. Результаты и обсуждения

Исследования влияния ионной бомбардировки при травлении в плазме C_3F_8/O_2 на электрофизические и оптические свойства при различных напряжениях смещения на ВЧ электроде проводились на гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs. Описание режимов роста и конструкции слоев гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs приведены в работах [17–19]. Травление осуществлялось при давлении 1 Па в смеси $C_3F_8(77\%)/O_2(23\%)$ при мощности ИСП 500 Вт, менялась только ВЧ мощность, время воздействия составляло 30 с для каждого эксперимента.

Холловские измерения относительных изменений концентрации n и подвижности μ электронов в гетероструктуре проводились до и после травления, и относительное их изменение (Δn , $\Delta \mu$) представлено на рис. 3 и 4. Из представленных зависимостей видно, что при больших энергиях (-120 В) заметно ухудшаются электрофизические параметры. Это связано с появлением радиационных дефектов, которые не стабильны и отжигаются при повышенных температурах.

Для оценки характера дефектообразования проводились релаксационный отжиг образцов при температуре 300°C в течение 30 мин после воздействия плазмы и измерения электрофизических характеристик (рис. 3 и 4). При рабочем режиме травления (-40 В) изменение электрофизических параметров незначительное.

Для оценки дефектообразования при ионной бомбардировке в режиме травления были исследованы спектры фотолюминесценции гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs до и после ионной бомбардировки в течение 30 с. Во всех измеренных спектрах (рис. 5) присутствуют две полосы люминесценции, с максимумами при ~ 1.35 и ~ 1.41 эВ, которые идентифицированы

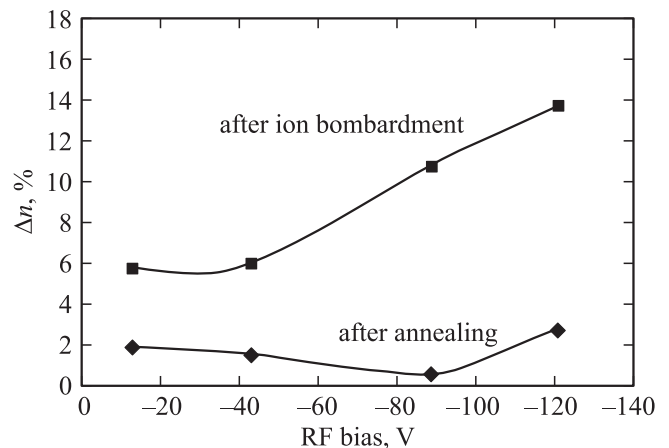


Рис. 3. Относительное изменение холловской концентрации электронов Δn после плазмохимической обработки и температурного отжига образцов.

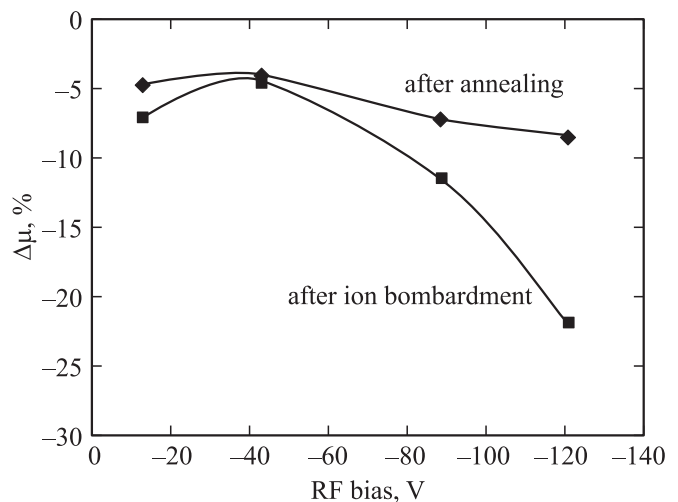


Рис. 4. Относительное изменение холловской подвижности $\Delta \mu$ электронов после плазмохимической обработки и температурного отжига образцов.

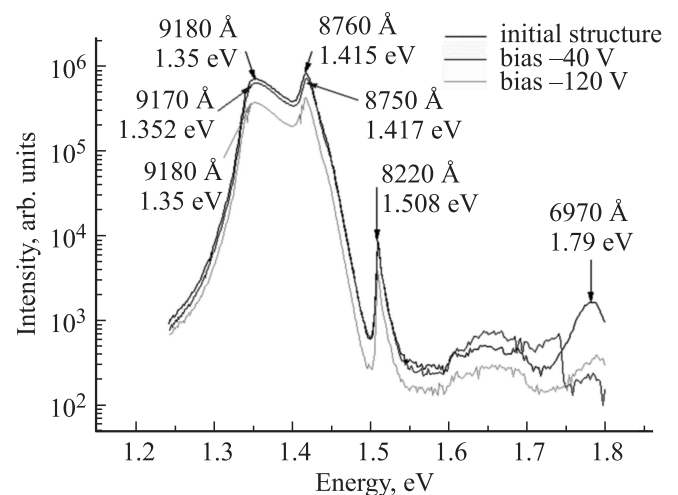


Рис. 5. Сравнение исходного спектра фотолюминесценции гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs со спектрами после ионной бомбардировки.

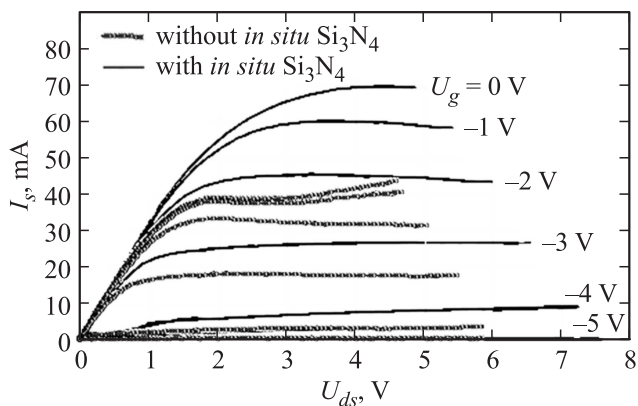


Рис. 6. Выходные вольт-амперные характеристики $I_x(U_{ds})$ при разных напряжениях на затворе U_g HEMT AlGaN/AlN/GaN с шириной затвора 50 мкм с пассивацией Si₃N₄ *in situ* и без пассивации.

как переходы из первой и второй электронных подзон в первую подзону тяжелых дырок в квантовой яме AlGaAs/InGaAs/GaAs. Пик в области ~ 1.5 эВ соответствует переходам в GaAs.

Сравнение исходного спектра фотолюминесценции со спектрами после плазменной обработки подтверждает, что дефекты не внесли значительного вклада в изменение поверхностного потенциала. При изменении значения поверхностного потенциала будет изменяться энергетический профиль квантовой ямы, что приведет к сдвигу оптических переходов по энергии. Из рис. 5 видно, что при рабочих режимах травления (-40 В) спектр фотолюминесценции не изменяется. При больших энергиях (-120 В) начинает уменьшаться интенсивность оптических переходов в квантовой яме AlGaAs/InGaAs/GaAs, что связано с поглощением света на радиационных дефектах.

Для оценки влияния пассивации *in situ* на характеристики HEMT AlGaN/AlN/GaN изготовлены на одной пластине транзисторы с пассивацией *in situ* и без нее. Для этого часть пластины была закрыта резистивной маской и подвержена жидкостному химическому травлению в буферном травителе. Данное травление не вносит радиационных дефектов в структуру. После удаления диэлектрика Si₃N₄ с части пластины на другой части пластины были сформированы щели в диэлектрике в местах дальнейшего формирования СВЧ затвора плазмохимическим травлением через резистивную маску в среде C₃F₈/O₂, участки без Si₃N₄ при травлении были закрыты резистом и не подвергались плазменному воздействию. После формирования щелей на всей пластине экспонировались затворы и наносилась затворная металлизация Ni/Au в одном технологическом процессе. Выходные вольт-амперные характеристики изготовленных HEMT AlGaN/AlN/GaN представлены на рис. 6.

Как видно по вольт-амперным характеристикам, транзисторы с затворами, сформированными через диэлек-

трик Si₃N₄, выращенный в одной ростовой камере с гетероструктурой, не требуют дополнительной пассивации и имеют максимальный ток насыщения при 0 на затворе в 1.5 раза больше, чем транзисторы без слоя Si₃N₄, сформированного *in situ*.

4. Заключение

В работе исследованы и оптимизированы режимы комбинированного ИСП и ВЧ травления в смеси C₃F₈/O₂, что позволило получить маленькие размеры щели в *in situ* диэлектрике Si₃N₄ за счет малого бокового растрыва первоначального размера через резистивную маску. Показано, что формирующееся смещение на нижнем электроде $\sim (-40)$ В при рабочем травлении щелей не приводит к дефектообразованию в барьерном слое структуры, ведущему к изменению электрофизических параметров гетероструктуры. Изготовленные HEMT AlGaN/AlN/GaN с пассивацией Si₃N₄ *in situ* имеют максимальный ток стока в 1.5 раза больше, чем HEMT AlGaN/AlN/GaN без *in situ* Si₃N₄. Это связано с увеличением концентрации основных носителей из-за нейтрализации заряда на поверхности гетероструктуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0011, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0011).

Список литературы

- [1] М. Гольцова. Электроника. Наука. Технология. Бизнес, **4**, 86 (2012).
- [2] L. Lugani, J.-F. Carlin, M.A. Py, N. Grandjean. Appl. Phys. Lett., **105**, 3 (2014).
- [3] J. Derluyn, S. Boeykens, K. Cheng, R. Vandersmissen. J. Appl. Phys., **98**, 054501 (2005).
- [4] П.А. Юнин, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов, С.А. Королев, А.И. Охапкин, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин. ФТП, **49** (11), 1469 (2015).
- [5] A. Alexewicz, M. Alomari, D. Maier, H. Behmenburg, C. Giesen, M. Heuken, D. Pogany, E. Kohn, G. Strasser. Solid-State Electron., **89**, 207 (2013).
- [6] M.J. Tadjer, J.T. Anderson, K.D. Hobart, M.A. Mastro, J.K. Hite, J.D. Caldwell, Y.N. Picard, F.J. Kub. J. Electron. Mater., **39** (11), 2452 (2010).
- [7] B. Heying, I.P. Smorchkova, R. Coffie, V. Gambin, Y.C. Chen, W. Sutton, T. Lam, M.S. Kahr, K.S. Sikorski, M. Wojtowicz. Electron. Lett., **43** (14), 789 (2007).
- [8] M. Germain, J. Derluyn, M. Van Hove, F. Medjdoub, J. Das, D. Marcon, S. Degroote, K. Cheng, M. Leys, D. Visalli, P. Srivastava, K. Geens, J. Viaene, B. Sijmus, S. Decoutere, G. Borghs. CS MANTECH Conf. (2010) 225 p.
- [9] A. Fontser'ea, A. Pérez-Tomás, P. Godignona, J. Millána. Solid-State Dev. Research Conf. (ESSDERC) (2012) 306 p.
- [10] X. Lu, J. Ma, H. Jiang, K.M. Lau. Appl. Phys. Lett., **104**, 032903 (2014).

- [11] В.Г. Мокеров, А.Л. Кузнецов, Ю.В. Федоров, Е.Н. Енюшкина, А.С. Бугасев, А.Ю. Павлов, Д.Л. Гнатюк, А.В. Зуев, Р.Р. Галиев, Е.Н. Овчаренко, Ю.Н. Свешников, А.Ф. Цацульников, В.М. Устинов. ФТП, **43** (4), 561 (2009).
- [12] К.Н. Томош. Нано- и микросистемная техника, **5**, 47 (2013).
- [13] Y.X. Li, P.J. French, R.F. Wolfenbittel. J. Vac. Sci. Technol., **13** (5), 2008 (1995).
- [14] В.Е. Kastenmeier, P.J. Matsuo, J.J. Beulens, G.S. Oehrlein. J. Vac. Sci. Technol., **14** (5), 2802 (1996).
- [15] J. Shim, A. Miyao, H. Sakurai, K. Matsushita, K. Onodera, K. Takaki, H. Kawasaki. J. Electrochem. Soc., **156** (1), 68 (2009).
- [16] В.А. Козлов, В.В. Козловский. ФТП, **35** (7), 769 (2001).
- [17] Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, В.П. Гладков, В.А. Кульбачинский, А.Н. Клочков, Н.А. Юзеева. ФТП, **45** (5), 666 (2011).
- [18] Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, И.С. Васильевский, В.А. Кульбачинский, П.Ю. Боков, Л.П. Авакянц, А.В. Червяков, П.П. Мальцев. ФТП, **47** (9), 1215 (2013).
- [19] G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov, D.S. Ponomarev, R.A. Khabibullin, V.A. Kulbachinskii, D.V. Gromov, P.P. Maltsev. Lithuan. J. Phys., **55** (4), 249 (2015).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of the fabrication process of AlGaN/AlN/GaN HEMT with *in situ* Si₃N₄ passivation

K.N. Tomosh, A.Yu. Pavlov, V.Yu. Pavlov,
R.A. Khabibullin, S.S. Arutyunyan, P.P. Maltsev

Institute of Ultra High Frequency
Semiconductor Electronics,
Russian Academy of Sciences,
123456 Moscow, Russia

Abstract The plasma chemical etching conditions for passivation layer Si₃N₄ in gas mixture C₃F₈/O₂ *in situ* at fabrication of AlGaN/AlN/GaN HEMT has been optimized. It has been found that the bias voltage 40–50 V on the RF electrode provides anisotropic etching of dielectric through the resist mask and does not induce radiation defects in the area of the gate metallization. To evaluate the influence of the *in situ* Si₃N₄ growth effect on transistor characteristics, AlGaN/AlN/GaN HEMT with and without *in situ* Si₃N₄ passivation have been fabricated. Maximum drain current of AlGaN/AlN/GaN HEMT with *in situ* Si₃N₄ at 0 V on gate is 1.5 times higher than without *in situ* Si₃N₄.