

07;15

Низкоэнергетическое бездефектное сухое травление барьерного слоя НЕМТ AlGaN/AlN/GaN

© С.В. Михайлович, А.Ю. Павлов[¶], К.Н. Томош, Ю.В. ФедоровИнститут сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Москва, Россия[¶] E-mail: p.alex.ur@yandex.ru

Поступило в Редакцию 29 января 2018 г.

Предложен метод бездефектного сухого травления барьерного слоя AlGaN, заключающийся в циклическом повторении операций плазмохимического окисления AlGaN и удалении образованного оксидного слоя реактивным ионным травлением в индуктивно-связанной плазме BCl_3 . Впервые с использованием предложенной технологии травления изготовлены НЕМТ AlGaN/AlN/GaN с заглубленным затвором. Показано, что значения токов полученных транзисторов не зависят от количества циклов травления, при этом положение рабочей точки по затвору смещается в сторону положительных напряжений (вплоть до транзисторов, работающих в режиме обогащения).

DOI: 10.21883/PJTF.2018.10.46100.17227

В настоящее время полупроводниковые СВЧ-приборы на основе GaN хорошо зарекомендовали себя как в сантиметровом, так и в миллиметровом диапазоне длин волн. Большинство исследований в данной области было направлено на создание монолитных интегральных схем различных частотных диапазонов, основанных на полевых транзисторах с высокой подвижностью электронов, работающих в режиме обеднения (depletion mode НЕМТ, *D-mode* НЕМТ) [1–3]. В последние годы появился значительный интерес к полевым транзисторам на основе GaN, работающим в режиме обогащения (enhancement mode НЕМТ, *E-mode* НЕМТ), предназначенным в основном для применения в цифровой и силовой электронике [4]. Подобные транзисторы можно реализовать различными методами, например путем выращивания гетероструктур с тонким барьерным слоем [4,5], травления барьерного слоя под затвором [6,7], имплантации фтора в подзатворную область [8], формирова-

ния под затвором области GaN *p*-типа [9]. Наиболее перспективными являются методы, использующие гетероструктуры с тонким барьерным слоем и травление барьерного слоя под затвором, поскольку они способствуют получению транзисторов с превосходными повторяемыми характеристиками [4,7].

Основное преимущество технологии травления барьерного слоя состоит в относительно простом создании транзисторов разных типов на одном кристалле. На данный момент наиболее популярным методом травления барьерного слоя нитридной гетероструктуры является плазмохимическое окисление этого слоя с последующим удалением образованного оксида реактивным ионным травлением в хлорсодержащей среде. Уменьшение толщины барьерного слоя на определенную величину происходит за счет циклического повторения операций окисления и удаления оксида. Поскольку за каждый цикл травления удаляется окисленный слой постоянной толщины, такое травление получило название „цифрового“. Исследователи в последние годы начали отказываться от плазмохимического реактивного ионного удаления окислов барьерного слоя нитридной гетероструктуры из-за возникновения радиационных дефектов в приповерхностном слое, влияющих на электрофизические свойства гетероструктуры. В современных работах, посвященных „цифровому“ травлению, предлагается удалять окисел барьерного слоя жидкостным химическим травлением, что позволит избежать образования дефектов, связанных с плазмохимическим травлением [10]. Однако данная технология имеет низкую скорость травления AlGaN (порядка 0.5 nm за один цикл) и используется при работе с гетероструктурами, имеющими тонкие (порядка 5 nm) барьерные слои. Сам технологический процесс является весьма трудоемким из-за необходимости использования нескольких установок для проведения одного цикла травления.

В настоящей работе предложен низкоэнергетический бездефектный метод „цифрового“ травления барьерного слоя AlGaN в подзатворной области транзисторов и продемонстрированы созданные с использованием данного метода НЕМТ AlGaN/AlN/GaN со смещенным положением рабочей точки по затвору вплоть до напряжений, характерных для транзисторов, работающих в режиме обогащения (*E-mode*).

Процесс окисления барьерного слоя AlGaN в кислородной плазме и процесс низкоэнергетического бездефектного травления образованного оксидного слоя осуществлялись в одной камере без перезагрузки образ-

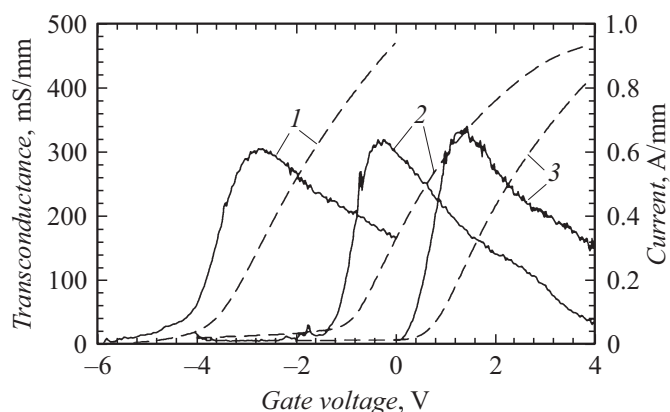


Рис. 1. Зависимости крутизны (сплошные линии) и токов стока (штриховые линии) от напряжения на затворе HEMT AlGaIn/AlN/GaN при напряжении между стоком и истоком 5 В. Зависимости 1 соответствуют первому типу транзисторов, изготовленных без травления барьерного слоя; зависимости 2 — второму типу транзисторов с тремя циклами „цифрового“ травления барьерного слоя; зависимости 3 — третьему типу транзисторов с пятью циклами травления барьерного слоя.

ца на установке Sentech SI-500 ICP с источником индуктивно-связанной плазмы (ИСП). Использование источника ИСП позволяет получить плазму с высокой плотностью и малыми энергиями заряженных частиц, взаимодействующих 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 оксидного 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 [11], что для минимизации

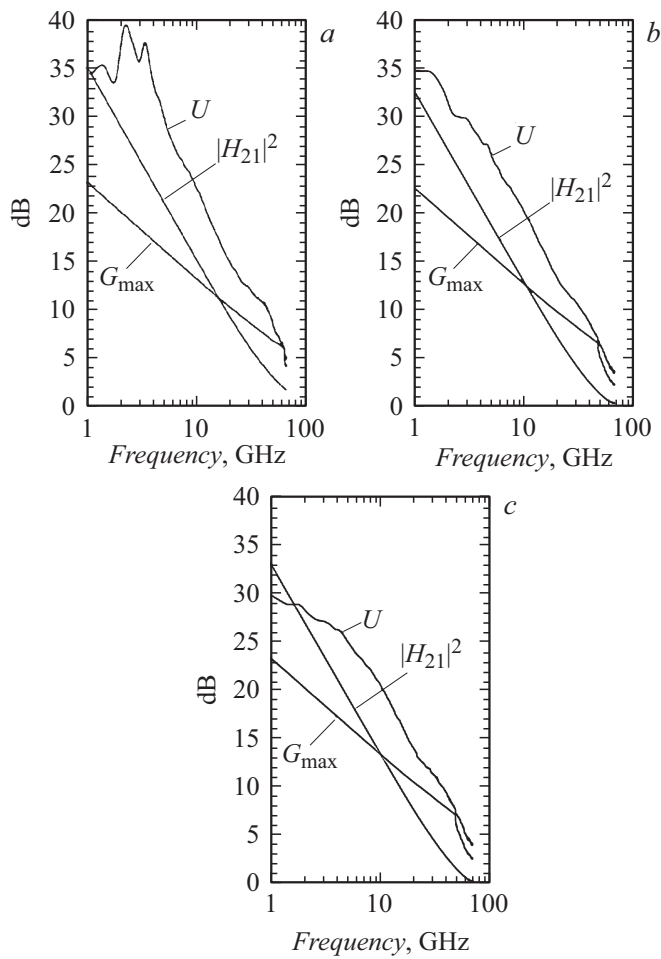


Рис. 2. Зависимости коэффициента усиления по току $|H_{21}|^2$, однонаправленного коэффициента усиления U и максимально устойчивого коэффициента усиления G_{\max} от частоты для трех типов НЕМТ AlGaIn/GaN при напряжении между стоком и истоком 5 В. *a* — для первого типа транзисторов при напряжении на затворе -2.6 В, *b* — для второго типа транзисторов при напряжении на затворе -0.2 В, *c* — для третьего типа транзисторов при напряжении на затворе $+1$ В.

дефектообразования при проведении процессов травления диэлектриков и полупроводников напряжение смещения на ВЧ-электроре не должно превышать 40 V. Однако, как отмечалось в работе [12], снятие оксидной пленки с поверхности нитридной гетероструктуры перед формированием омических контактов с использованием РИТ-ИСП при напряжении смещения на ВЧ-электроре менее 20 V, по-видимому, не позволяет полностью удалить образованную в процессе плазмохимической обработки поверхности GaN ионами из плазмы BCl_3 „паразитную“ пленку V_xCl_y , что в свою очередь препятствует полному удалению с поверхности гетероструктуры оксидного слоя. С учетом этого в работе был подобран режим травления оксидной пленки, сформированной при взаимодействии кислородной плазмы с поверхностью барьерного слоя AlGaIn, обеспечивающий напряжение смещения на ВЧ-электроре в диапазоне от 20 до 40 V. Мощность источника ИСП составляла 100 W, мощность ВЧ-генератора 10 W при давлении BCl_3 в камере порядка 1 Pa и потоке газа 10 sccm. При данных условиях напряжение смещения на ВЧ-электроре составляло 25 V, что обеспечило бездефектное селективное удаление оксидной пленки. Селективность была подтверждена отсутствием следов травления AlGaIn при длительном воздействии РИТ-ИСП через диэлектрическую маску. Представленная технология травления барьерного слоя была апробирована при изготовлении НЕМТ AlGaIn/AlN/GaN.

Полевые транзисторы были изготовлены на гетероструктуре $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$, выращенной на подложке Al_2O_3 путем химического осаждения из газовой фазы методом разложения металлоорганических соединений с толщиной барьерного слоя 13.7 nm, подвижностью электронов $1600 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ и концентрацией $1.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, измеренными при температуре 300 K. Сопротивление несплавных омических контактов было равно $0.23 \Omega \cdot \text{mm}$. Слоеое сопротивление канала составило $300 \Omega/\square$. Технология формирования меза-изоляции и омических контактов более подробно описана в работах [13,14]. После формирования омических контактов наносился слой диэлектрика Si_3N_4 толщиной 100 nm. Далее через маску в резисте на основе полиметилметакрилата производилось плазмохимическое травление щелей в Si_3N_4 шириной порядка 220 nm. Затем через маску в Si_3N_4 производилось „диффузное“ травление барьерного слоя. Каждый цикл травления состоял из чередования обработки пластины в кислородной плазме при давлении 10 Pa, мощности ИСП 600 W, ВЧ-мощности 15 W в течение 15 s (смещение на ВЧ-электроре 25 V) и обработки пластины в плазме

BCl_3 при давлении 1 Па, мощности ИСП 100 W, ВЧ-мощности 10 W в течение 45 s (смещение на ВЧ-электроде 23–25 V). За один цикл травления удалялся слой AlGaN толщиной порядка 1.5 nm. После травления барьерного слоя проводилось снятие диэлектрической маски Si_3N_4 в растворе $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}$ (4:25) в течение 2 min с последующим нанесением Al_2O_3 толщиной 5 nm методом атомного слоевого осаждения. Далее при помощи электронно-лучевой литографии и термического напыления металлов Ni/Au формировались T-образные затворы Шоттки.

На одной пластине было изготовлено три типа транзисторов с шириной затворов $2 \times 50 \mu\text{m}$. В первом типе травление барьерного слоя не проводилось, во втором проводилось три цикла травления барьерного слоя, в третьем — пять циклов. На рис. 1 представлены значения крутизны и токов полученных транзисторов. Как можно видеть, значения токов не зависят от количества циклов травления, что подтверждает отсутствие образования дефектов в ходе травления барьерного слоя. Значения крутизны также остаются на уровне 320 mS/mm, при этом максимум смещается в сторону положительных напряжений на затворе при увеличении количества циклов травления.

На рис. 2 представлены основные частотные характеристики. Для первого типа транзисторов максимальные частоты усиления по току и однонаправленного коэффициента усиления составили $f_T = 57 \text{ GHz}$ и $f_{\text{max}} = 125 \text{ GHz}$, для второго типа — $f_T = 44 \text{ GHz}$ и $f_{\text{max}} = 102 \text{ GHz}$, для третьего типа — $f_T = 46 \text{ GHz}$ и $f_{\text{max}} = 104 \text{ GHz}$. Значения максимальных частот для первого типа транзисторов оказались выше, поскольку длина затворов была порядка 180 nm, в то время как для второго и третьего типов транзисторов она в силу технологических особенностей изготовления составила порядка 220 nm.

Таким образом, в работе продемонстрирован метод низкоэнергетического сухого травления барьерного слоя, позволяющий создавать НЕМТ AlGaN/AlN/GaN со смещенным положением рабочей точки по затвору вплоть до напряжений, характерных для транзисторов, работающих в режиме обогащения. Помимо этого метод позволяет создавать монолитные интегральные схемы, сочетающие в себе транзисторы, работающие в разных режимах (*D-mode* и *E-mode*), что открывает новые классы приборов, в том числе и цифровых, на основе широкозонных гетероструктур AlGaN/AlN/GaN.

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

Список литературы

- [1] Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Бугаев А.С., Матвеев О.С., Галиев Р.Р., Зуев А.В., Павлов А.Ю., Михайлович С.В. // Микроэлектроника. 2016. Т. 45. В. 2. С. 135–143.
- [2] Галиев Р.Р., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Майтама М.В., Матвеев О.С., Михайлович С.В., Федоров Ю.В., Щербакова М.Ю. // Нано- и микросистемная техника. 2015. В. 2 (175), С. 21–32.
- [3] Shinohara K., Regan D.C., Tang Y., Corrión A.L., Brown D.F., Wong J.C., Robinson J.F., Fung H.H., Schmitz A., Oh T.C., Kim S.J., Chen P.S., Nagele R.G., Margomenos A.D., Micovic M. // IEEE Trans. Electron Dev. 2013. V. 60. N 10. P. 2982–2996.
- [4] Brown D.F., Shinohara K., Williams A., Milosavljevic I., Grabar R., Hashimoto P., Willadsen P.J., Schmitz A., Corrión A.L., Kim S., Regan D., Butler C.M., Burnham S.D., Micovic M. // IEEE Trans. Electron Dev. 2011. V. 58. N 4. P. 1063–1067.
- [5] Журавлев К.С., Малин Т.В., Мансуров В.Г., Земляков В.Е., Егоркин В.И., Парнес Я.М. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 14. С. 72–79.
- [6] Burnham Sh.D., Boutros K., Hashimoto P., Butler C., Wong D.W.S., Hu M., Micovic M. // Phys. Status Solidi C. 2010. V. 7. N 7–8. P. 2010–2012.
- [7] Hahn H., Benkhelifa F., Ambacher O., Alam A., Heuken M., Yacoub H., Noculak A., Kalisch H., Vescan A. // Jpn. J. Appl. Phys. 2013. V. 52. N 9. P. 090204.
- [8] Jia Sh., Cai Y., Wang D., Zhang B., Lau K.M., Chen K.J. // IEEE Trans. Electron Dev. 2006. V. 53. N 6. P. 1474–1477.
- [9] Ерофеев Е.В., Федин И.В., Федина В.В., Степаненко М.В., Юрьева А.В. // ФТП. 2017. Т. 51. В. 9. С. 1278–1281.
- [10] Chakroun A., Jaouad A., Bouchilaoun M., Arenas O., Soltani A., Maher H. // Phys. Status Solidi A. 2017. V. 214. N 8. P. 1600836.
- [11] Томош К.Н., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Хабибуллин Р.А., Арутюнян С.С., Мальцев П.П. // ФТП. 2016. Т. 50. В. 10. С. 1434–1438.
- [12] Андрианов Н.А., Кобелев А.А., Смирнов А.С., Барсуков Ю.В., Жуков Ю.М. // ЖТФ. 2017. Т. 87. В. 3. С. 413–418.
- [13] Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н., Арутюнян С.С., Федоров Ю.В., Мальцев П.П. // Микроэлектроника. 2017. Т. 46. В. 5, С. 340–347.
- [14] Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Слаповский Д.Н. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 22. С. 96–103.