

AlN/GaN-гетероструктуры для нормально закрытых транзисторов

© К.С. Журавлев^{1,2}, Т.В. Малин¹, В.Г. Мансуров¹, О.Е. Терещенко^{1,2}, К.К. Абгарян³,
Д.Л. Ревизников³, В.Е. Земляков⁴, В.И. Егоркин⁴, Я.М. Парнес⁵,
В.Г. Тихомиров⁵, И.П. Просвирин⁶

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

³ Вычислительный центр им. А.А. Дородницына. Федеральный исследовательский центр „Информатика и управление“ Российской академии наук, 119333 Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, 124498 Зеленоград, Москва, Россия

⁵ ЗАО „Светлана–Электронприбор“, 194156 Санкт-Петербург, Россия

⁶ Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: zhur@isp.nsc.ru

(Получена 30 августа 2016 г. Принята к печати 5 сентября 2016 г.)

Рассчитана конструкция AlN/GaN гетероструктур со сверхтонким AlN-барьером для нормально закрытых транзисторов. Развита технология молекулярно-лучевой эпитаксии *in situ* пассивированных гетероструктур SiN/AlN/GaN с двумерным электронным газом. Продемонстрированы нормально закрытые транзисторы с максимальной плотностью тока около 1 А/мм, напряжением насыщения 1 В, крутизной до 350 мС/мм, пробивным напряжением более 60 В. В транзисторах практически отсутствуют эффекты затворного и стокового коллапса тока.

DOI: 10.21883/FTP.2017.03.44215.8287

1. Введение

Нитрид галлия обладает уникальными физическими свойствами и имеет замечательный потенциал для высокотемпературной высокочастотной и силовой электроники в силу большой ширины запрещенной зоны, высокой пиковой и насыщенной скорости электронов в электрическом поле. Его важным качественным преимуществом перед другими широкозонными материалами, такими как карбид кремния и алмаз, является возможность создания гетероэпитаксиальных структур (ГЭС), что обеспечивает широкие предпосылки вариации зонной структуры, создания низкоразмерных ГЭС с новыми физическими свойствами, получение двумерного электронного газа (ДЭГ) с высоким уровнем параметров. Ключевой проблемой конструирования транзисторных ГЭС является широкозонный барьер, который обеспечивает появление ДЭГ из-за разности в спонтанной и пьезоэлектрической поляризации материалов барьера и канала и его локализацию вблизи гетерограницы. Конструкция барьера во многом определяет величины концентрации и подвижности двумерных электронов. Эти параметры задают наиболее важные характеристики мощных полевых СВЧ и силовых транзисторов: выходную мощность, коэффициент полезного действия, крутизну проходной характеристики, коммутируемые напряжения и токи, частоту переключения и т. д. [1].

Различные конструкции барьеров ГЭС для транзисторов со встроенным каналом высоко подвижных электронов (depletion mode НЕМТ) были предложены и изучены. Наиболее перспективными являются барьеры на основе тройных растворов AlGaIn и AlInN [2,3]. ГЭС со сверхтонким AlN-барьером признаны наиболее подходящими для изготовления транзисторов крайне высокого частотного диапазона из-за уменьшения эффектов короткого канала и низкого порогового напряжения [4–6]. Уже продемонстрированы AlN/GaN-транзисторы с предельной частотой усиления по току и мощности 342 и 518 ГГц, соответственно [5,7,8]. Активно развиваются транзисторы на основе *in situ* пассивированных AlN/GaN-ГЭС, в которых получены малые токи утечки без дополнительного подзатворного диэлектрика [9] и достигнута рекордная комбинация высокого пробивного напряжения и удельной проводимости [10].

В настоящее время значительные усилия направлены на создание нитрид-галлиевых транзисторов с индуцированным каналом (enhanced mode НЕМТ), которые находятся в закрытом (низкая проводимость) состоянии при нулевом потенциале на затворе. Такие транзисторы могут быть использованы в цифровых интегральных схемах и устройствах силовой электроники [1]. Одним из наиболее перспективных направлений воспроизводимого получения Е-НЕМТ является использование AlN/GaN-гетероструктур со сверхтонким

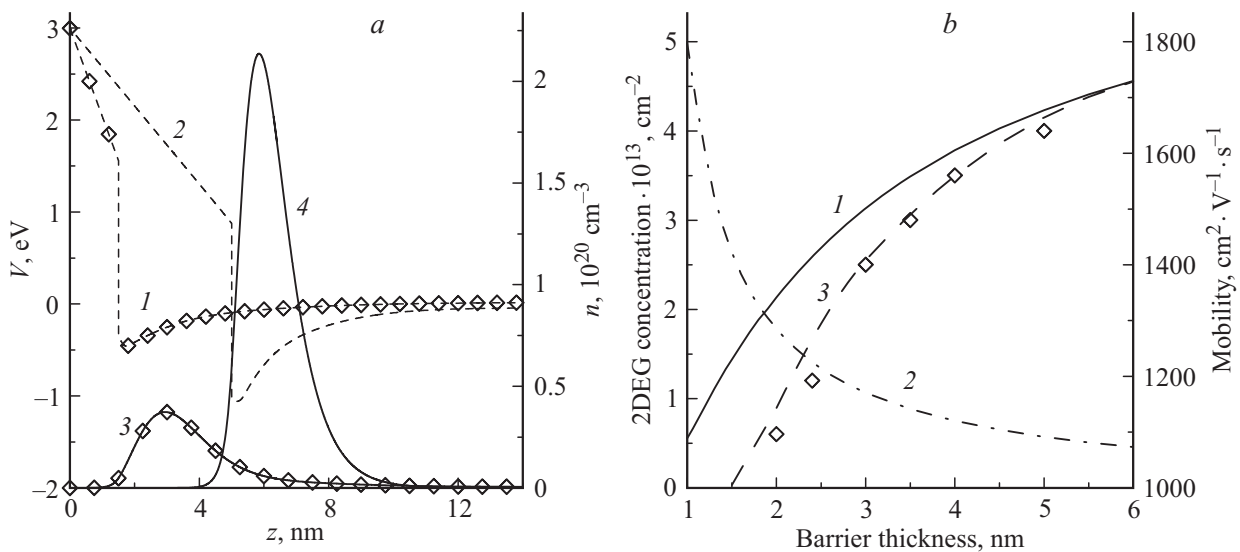


Рис. 1. *a* — профили потенциальной энергии (штриховые кривые 1,2, левая шкала) и распределение плотности ДЭГ (сплошные кривые 3,4, правая шкала) при различной толщине барьерного слоя AlN в AlN/GaN-ГЭС. Маркированные кривые 1,3 — 1.5 нм, сплошные кривые 2,4 — 5.0 нм. *b* — зависимости концентрации (сплошная кривая 1, левая шкала) и подвижности (штрихпунктирная кривая 2, правая шкала) двумерных электронов в ГЭС от толщины барьерного слоя. Штриховой линией 3 показана концентрация электронов при корректировке модели путем введения сигмоидальной зависимости плотности связанного заряда на гетерогранице. Ромбы соответствуют экспериментальным значениям из работы [23].

(менее 6 нм) барьером [11]. Другие подходы получения E-HEMT, такие как рост AlGaIn/GaN-ГЭС с тонким (10 нм) AlGaIn-барьером [12], стравливание части AlGaIn-барьера, расположенной под затвором [13,14], формирование p - n -перехода под затвором [15], обработку AlGaIn-барьера во фторидной плазме [16], рост N -полярных ГЭС [17], не обеспечивают необходимой однородности, воспроизводимости и стабильности приборов.

В настоящей работе представлены результаты разработки конструкции и технологии выращивания AlN/GaN-ГЭС для E-HEMT. Поверхность ГЭС пассивировалась пленкой SiN в камере роста установки молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). На основе SiN/AlN/GaN ГЭС изготовлены E-HEMT и исследованы их характеристики.

2. Расчет AlN/GaN-гетероструктур и транзисторов

Для определения толщины барьерного слоя AlN, позволяющего реализовать E-HEMT, был проведен расчет концентрации и подвижности двумерных электронов в AlN/GaN-ГЭС с различной толщиной барьера. Расчет выполнен на базе многомасштабной компьютерной модели, представленной в работах [18,19]. В ее основе лежит трехуровневая схема многомасштабного моделирования наноразмерных полупроводниковых ГЭС с учетом эффектов спонтанной и пьезоэлектрической поляризации. Схема объединяет квантово-механические расчеты на атомарном уровне для получения плотности

зарядов на гетерогранице, расчет распределения носителей в ГЭС на основе решения системы уравнений Шредингера и Пуассона, а также расчет подвижности электронов в ДЭГ с учетом различных механизмов рассеяния. С целью ускорения вычислительного процесса при расчете электронной плотности в ГЭС применен подход, основанный на аппроксимации нелинейной зависимости электронной плотности от потенциала в сочетании с линейризацией уравнения Пуассона. При расчете энергетической структуры и концентрации ДЭГ высота энергетического барьера на поверхности ГЭС принималась равной $\phi = 3.0$ эВ, поскольку теоретически и экспериментально определенная высота барьера в контакте металл-AlN составляет примерно 3 эВ [20–22]. При расчете подвижности электронов учитывались механизмы рассеяния электронов на полярных оптических и акустических фононах, на дислокациях, на шероховатостях гетерограницы и пьезоэлектрическом потенциале. Использовалось правило Маттисена для суммарного времени релаксации, определяющего подвижность электронов. Для расчета отдельных механизмов рассеяния использовались известные формулы, приведенные, например, в работе [23], а также следующие параметры ГЭС: плотность дислокаций $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, высота шероховатости гетерограницы 1.2 нм, корреляционная длина 6 нм. На рис. 1 приведены профили потенциальной энергии и распределения плотности ДЭГ при различной толщине барьерного слоя в ГЭС, а также зависимости концентрации и подвижности двумерных электронов от толщины барьерного слоя в ГЭС. Из рисунка видно, что концентрация электронов повыша-

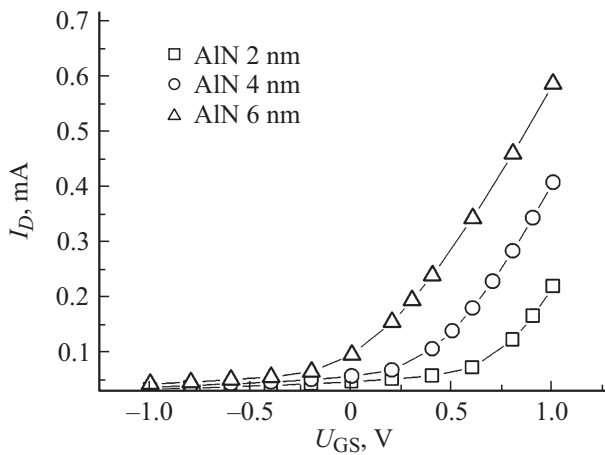


Рис. 2. Расчетные передаточные ВАХ SiN/AlN/GaN-транзистора при различной толщине барьерного слоя (2, 4 и 6 нм). Потенциал на стоке 5 В, ток соответствует ширине затвора 1 мкм.

ется при возрастании толщины барьера. Это связано с заглублением дна треугольной потенциальной ямы для электронов, сформированной вблизи гетерограницы, по сравнению с уровнем Ферми из-за увеличения встроенного поляризации индуцированного электрического поля в барьере. Приведенные результаты получены с использованием плотности связанного заряда на гетерогранице, соответствующего псевдоморфному росту. В области малых толщин барьера рассчитанная таким образом концентрация электронов существенно превосходит экспериментальные значения [4,22]. Наблюдаемое расхождение расчетных и экспериментальных данных, по-видимому, связано с неточным заданием плотности заряда на гетерогранице. В области малых толщин барьера не все интерфейсные атомы дают вклад в поляризационные эффекты, что приводит к меньшей плотности нескомпенсированного заряда на гетерогранице. В этой связи в модель была введена сигмоидальная зависимость плотности заряда на гетерогранице от толщины барьерного слоя в области малых толщин барьера (< 6 нм). Концентрация электронов, рассчитанная с учетом этого, представлена на рис. 1 штриховой линией. Видно, что таким образом удастся хорошо описать экспериментальные данные. Тем не менее необходимы дополнительные исследования для выяснения причины такого явления. Рассчитанная подвижность электронов монотонно снижается с увеличением толщины барьера. Это напрямую связано с изменением концентрации электронов, в силу концентрационной зависимости рассеяния на полярных оптических фононах, акустических фононах и на шероховатостях интерфейса [21]. В работах [4,22] было экспериментально показано, что при очень малой толщине барьера (≤ 2 нм) подвижность электронов немонотонно изменяется с увеличением толщины барьера. Такое поведение связано с рассеянием на шероховатостях

поверхности ГЭС, которое не учитывалось в нашем расчете.

Для моделирования нормально закрытых нитрид галлиевых транзисторов на основе SiN/AlN/GaN-ГЭС использовались широко известные программные пакеты для численного моделирования полупроводниковых приборов TCAD „Synopsys“ и оригинальные программы моделирования физических эффектов в полупроводниках. Описание разработанных моделей приведено в работах [24,25]. При моделировании учитывались присутствие пассивирующего SiN-слоя на поверхности ГЭС и его влияние на концентрацию электронов в канале по модели, предложенной в работе [26]. Необходимость прогнозирования выходных характеристик транзисторов потребовала расчета распределения электронов во всех областях ГЭС, подвижности электронов с учетом их разогрева и субмикронной длины затвора. Расчеты не учитывали ряд трудно определяемых параметров, например распределение зарядов на поверхности, влияние пьезополяризации в очень тонком барьерном слое, влияние дислокаций в объеме ГЭС, тем не менее позволили предсказать влияние толщины барьерного слоя на передаточную характеристику транзистора и величину напряжения отсечки. На рис. 2 представлены расчетные зависимости тока стока (I_D) от напряжения на затворе транзистора (U_{GS}) при различной толщине AlN-барьера. Как видно из рис. 2, изменение типа транзистора с нормально открытого на нормально закрытый может происходить при уменьшении толщины барьерного слоя до 3–4 нм. При такой толщине барьерного слоя рассчитанная величина I_D не превышает 1 мА/мм ширины затвора. Обеднение канала транзистора при уменьшении толщины барьерного слоя обусловлено влиянием электрического поля барьера Шоттки, которое усиливается из-за уменьшения встроенного поляризации индуцированного электрического поля в барьере [27].

3. Рост AlN/GaN-гетероструктур

AlN/GaN-ГЭС выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в установке типа CBE Riber-32N с твердотельными источниками галлия и алюминия и газообразного аммиака, как источника активного азота. ГЭС растились на подложках сапфира ориентации (0001) и состояли из буферного слоя AlN толщиной около 300 нм, слоя GaN толщиной 1.5 мкм и барьерного слоя AlN толщиной около 5 нм. Для очистки от загрязнений подложка отжигалась 12 ч при температуре 600°C и 1 ч при температуре 900°C в камере загрузки при давлении ниже $7.0 \cdot 10^8$ Торр. Затем подложка 10 мин нитридировалась в потоке аммиака 25 н.мл/мин при 840°C. Температура подложки контролировалась инфракрасным пирометром. Буферный слой AlN был выращен при 940°C в потоке аммиака 15 н.мл/мин. При росте слоя GaN температура понижалась примерно до 800°C, а поток аммиака

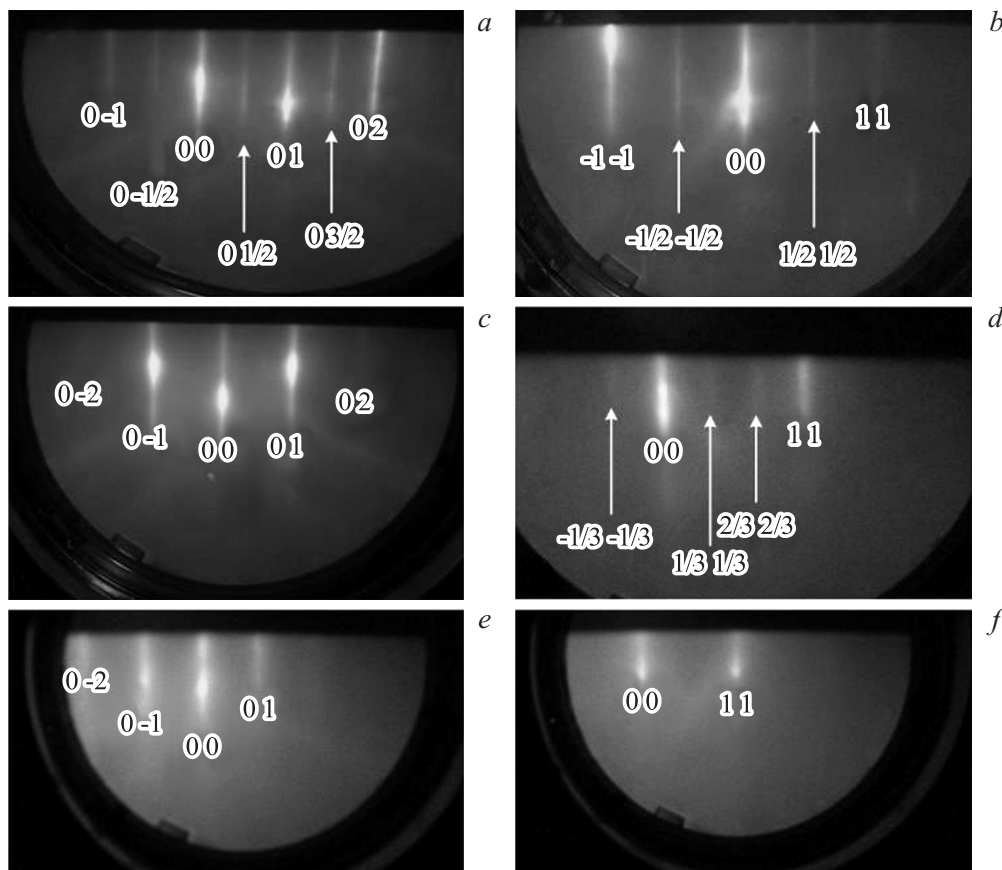


Рис. 3. ДБЭ картины поверхности (0001)AlN: исходная поверхность при $T = 450^\circ\text{C}$ (*a, b*), поверхность после нанесения примерно 0.5–1.0 монослоя SiN (*c, d*) и примерно 2 монослоев SiN (*e, f*) при $T = 800^\circ\text{C}$. На картине отмечены целочисленные и дробные рефлексы поверхностных сверхструктур. ДБЭ картины в левой колонке получены от поверхностей исследуемых пленок в направлении $[11-20]$, в правой колонке в направлении $[1-100]$ соответственно.

ка повышался до 150 н.мл/мин. Для роста барьерного AlN-слоя быстро, за доли секунды изменить условия роста нельзя из-за достаточно большой теплоемкости нагревателя подложки и конечной скорости откачки аммиака, поэтому были определены компромиссные условия роста формирования верхней части AlN/GaN-гетероструктуры. Для этого выращивались и исследовались короткопериодные AlN/GaN-сверхрешетки, с толщиной слоев около 2 нм. Атомное строение границ раздела и особенности морфологии AlN/GaN-ГЭС были изучены методами спектроскопии тонкой структуры поглощения рентгеновских лучей (EXAFS-спектроскопия) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). EXAFS-спектроскопия позволяет изучить устройство гетерограниц на атомарном уровне, определить количество и тип соседей для атомов, поглощающих рентгеновское излучение, — атомов галлия в нашем случае. Было обнаружено, что число атомов Ga во второй координационной сфере атома Ga меньше числа, рассчитанного для резкой гетерограницы AlN/GaN, из-за частичного замещения атомов Ga атомами Al, т.е. перемешивания гетерограницы. Степень перемешивания возрастает примерно с 25 до 35% при повышении температуры роста от 800

до 900°C [28,29]. Поэтому верхняя часть AlN/GaN-ГЭС выращивалась при температуре около 800°C . ПЭМ показала, что в выбранных условиях роста получается резкая AlN/GaN-гетерограница [30].

Ультратонкая пленка нитрида кремния наносилась на поверхность ГЭС непосредственно в камере роста установки МЛЭ. В качестве прекурсоров использовались газы (силан и аммиак), которые разлагались на поверхности AlN при температуре около 800°C . Для *in situ* контроля формирования слоя SiN использовался метод дифракции быстрых электронов (ДБЭ). На рис. 3 показана эволюция картин ДБЭ, измеренных в направлении $[11-20]$ и $[1-100]$ соответственно. Исходная поверхность AlN(0001) характеризовалась структурой (2×2) , для наблюдения которой понижали температуру до $400-500^\circ\text{C}$, сохраняя поток аммиака 20–50 н.мл/мин (см. рис. 3, *a, b*). Нанесение SiN на поверхность AlN приводило к формированию сверхструктуры поверхности $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ (см. рис. 3, *c, d*). При дальнейшем нанесении SiN появлялась сверхструктура (1×1) (см. рис. 3, *e, f*), которая затем исчезала из-за аморфизации слоя SiN. Для определения химического состава и оценки толщины слоя диэлектрика на поверхности ГЭС

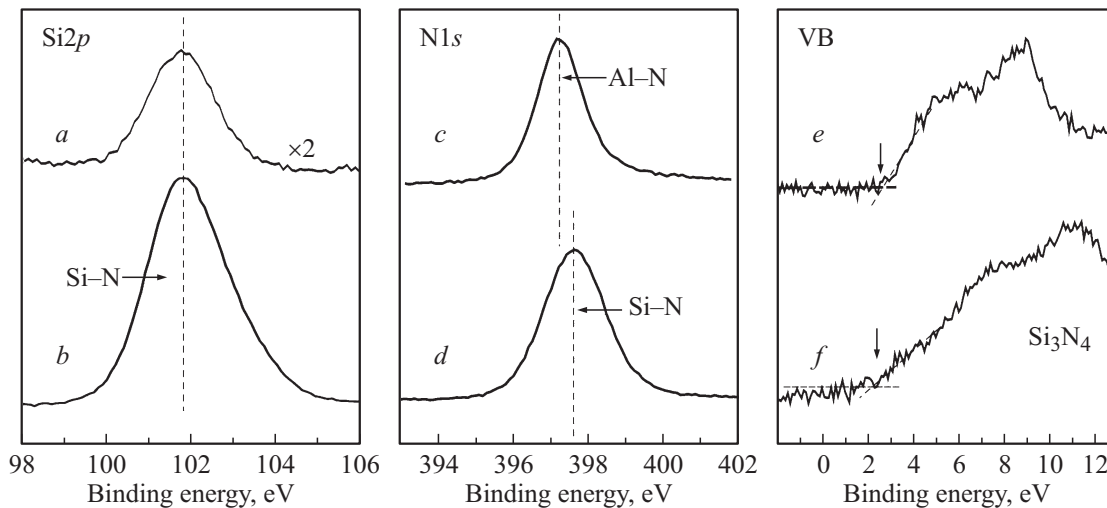


Рис. 4. РФЭ спектры линий Si2p (a), N1s (c) и валентной зоны (VB) (e) при фиксированной экспозиции поверхности AlN в потоках SiH₄ и NH₃ и температуре подложки 800°. Экспозиция поверхности AlN в потоке SiH₄ 0.02 н.мл/мин и потоке NH₃ 8.0 н.мл/мин в течение 180 мин. Для сравнения показаны спектры объемного соединения Si₃N₄ (b, d, f).

были измерены и проанализированы спектры рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Эксперименты проводились на фотоэлектронном спектрометре фирмы SPECS (Германия) с полусферическим анализатором PNOIBOS-150-MCD-9 и рентгеновским монохроматором FOCUS-500 (излучение AlK_α, энергия фотона $h\nu = 1486.74$ эВ, мощность 200 Вт). Шкала энергий связи была предварительно откалибрована по положению пиков основных уровней Au4f_{7/2} (84.00 эВ) и Cu2p_{3/2} (932.67 эВ). Энергия связи и полная ширина на полувысоте представлены с точностью 0.05 эВ.

На рис. 4 приведены РФЭ спектры нитрида кремния, сформированного на поверхности ГЭС, и спектры объемного Si₃N₄. РФЭ спектры линий Si2p, N1s, Al2p и валентной зоны (VB) после экспозиции поверхности AlN в потоке SiH₄ 0.02 н.мл/мин и потоке NH₃ 8.0 н.мл/мин в течение 180 мин при температуре подложки 800°C показаны на рис. 4, a, c, e, спектры объемного Si₃N₄ приведены на рис. 4, b, d, f. Из рис. 4, a, b видно, что энергии связи линии Si2p в пленке нитрида кремния и в объемном соединении Si₃N₄ совпадают, что означает одинаковое зарядовое состояние и соответственно одинаковую химическую связь атомов кремния в исследуемых веществах. Линия N1s в спектре пленки сдвинута в меньшие энергии связи относительно линии в объемном Si₃N₄. Это связано с тем, что интегральный сигнал линии N1s является суммой вкладов от барьера AlN и пленки Si₃N₄, содержащих азот с разной энергией связи. Спектр валентной зоны (VB) также содержит значительную составляющую от AlN из-за большой глубины выхода фотоэлектронов (3 нм) по сравнению с толщиной пленки Si₃N₄. Тем не менее положение максимума потолка валентной зоны в пленке и объемном Si₃N₄ совпадают с точностью определения максимума VB. Таким образом, по химической связи кремния, наличие

химического сдвига линии азота и положению потолка VB в пленке нитрида кремния можно сделать вывод о формировании Si₃N₄ на поверхности AlN. Оценка толщины слоя Si₃N₄ по соотношению Si/Al с учетом длины свободного пробега фотоэлектронов [31] дает значение толщины около 1 нм. Считая постоянной скоростью роста пленки Si₃N₄, мы оценили толщину, при которой происходят изменения структуры поверхности (см. подпись к рис. 3). Отметим, что на поверхности присутствовал также кислород в количестве 0.5–1 монослой, в основном в химическом соединении воды, обусловленный переносом и загрузкой образцов в спектрометр через воздух.

Холловская подвижность двумерных электронов в SiN/AlN/GaN-ГЭС при комнатной температуре составляла $\mu = 1200$ см²/В·с при концентрации электронов $n_e = 1.1 \cdot 10^{13}$ см⁻².

4. SiN/AlN/GaN-транзисторы

На основе выращенных ГЭС методом оптической литографии были сформированы полевые транзисторы с затвором Шоттки. Для получения мезатранзистора ГЭС травилась в плазме CCl₄. Омические контакты из слоев Ti/Al/Ni/Au вжигались в печи быстрого отжига при температуре 850°. Затвор из Ni/Au имел длину (L_g) 0.6 мкм, а ширина затвора варьировалась от 50 до 400 мкм. Поверхность между истоком и стоком покрывалась нитридом кремния на установке плазменного осаждения. До создания затвора удельный ток прибора равнялся $I_D = 1$ А/мм, в приборе с затвором ток падал до нуля и при приложении положительных смещений до 3 В на затвор, прибор открывался до уровня 0.5 А/мм. В отличие от известных методов создания E-HEMT не потребовалось использовать специальные плазменные

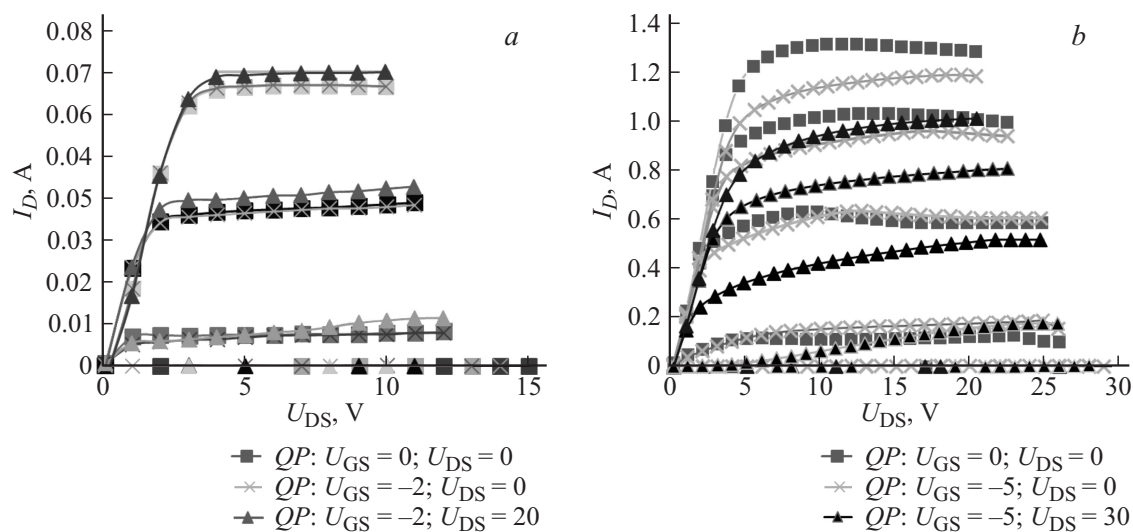


Рис. 5. Импульсные ВАХ, полученные разверткой из разных точек покоя (QP). *a* — E-HEMT для точек покоя ($U_{GS} = 0\text{ В}$, $U_{DS} = 0\text{ В}$), ($U_{GS} = -2\text{ В}$, $U_{DS} = 20\text{ В}$) коллапс тока при $U_{DS} = 10\text{ В}$ составил $\sim 2\%$. В точке покоя ($U_{GS} = -2\text{ В}$, $U_{DS} = 20\text{ В}$) происходит зарядка состояний под затвором и между затвором и стоком. *b* — серийный транзистор типа „Triquint TGF2023“ для точек покоя ($U_{GS} = 0\text{ В}$, $U_{DS} = 0\text{ В}$), ($U_{GS} = -5\text{ В}$, $U_{DS} = 0\text{ В}$), ($U_{GS} = -5\text{ В}$, $U_{DS} = 30\text{ В}$). В точке покоя ($U_{GS} = -5\text{ В}$, $U_{DS} = 0\text{ В}$) происходит зарядка состояний только под затвором. Коллапс тока при $U_{GS} = -5\text{ В}$ и $U_{DS} = 30\text{ В}$ составил $\sim 30\%$.

обработки, травление канала или легирование компенсирующими акцепторными примесями. Закрытые транзисторы получились за счет реализации конструкции ГЭС, обеспечившей необходимую близость канала транзистора к затвору.

В полученных транзисторах исследовались статические и импульсные вольт-амперные характеристики (ВАХ) и явление коллапса тока. Сравнение статических и импульсных ВАХ показало, что величина I_D при работе в непрерывном режиме меньше примерно на 15% по сравнению с током в импульсном режиме из-за перегрева транзистора. Удельная крутизна транзистора достигала 350 мС/мм, пробивное напряжение 60 В.

Коллапс тока обусловлен быстрым захватом электронов на ловушки. Это приводит к образованию зарядных областей на поверхности и в объеме ГЭС, выступающих в роли дополнительных „виртуальных затворов“, снижающих ток транзистора. Степень уменьшения тока пропорциональна концентрации ловушек и характеризует качество ГЭС. Для оценки величины токового коллапса были измерены импульсные ВАХ с помощью специализированного оборудования, позволяющего выбирать начальную точку развертки ВАХ (точку покоя), то есть напряжение на затворе (U_{GS}) и напряжение между истоком и стоком (U_{DS}). Точка покоя устанавливалась в паузе между измерительными импульсами. Если в качестве точки покоя выбрать нулевые значения U_{GS} и U_{DS} , то ловушки не успевают заряжаться и снижения I_D не происходит. При подаче отрицательного U_{GS} происходит зарядка ловушек, расположенных под затвором транзистора, электронами, туннелирующими из затвора. При подаче положительного U_{DS} электроны из затвора захватываются на ловушки, находящиеся

на поверхности и в буферном слое в области между затвором и стоком транзистора. Таким образом, выбор точки покоя позволяет выделить вклад ловушек, расположенных в различных местах транзистора. При этом предполагается, что измерительные импульсы короче характерного времени перезарядки ловушек, т. е. состояние ловушек задается импульсами начальной точки и не изменяется при измерении ВАХ. Разница значений I_D при фиксированном значении U_{DS} для ВАХ, снятых из различных точек покоя (U_{GS} , $U_{DS} = 0$; и U_{GS} , $U_{DS} \neq 0$), определяет значение коллапса тока [32]. Отметим, что поскольку измерительные импульсы подаются при наличии постоянного ненулевого напряжения на затворе и стоке, то для получения привычного вида ВАХ между стоком и истоком подают напряжение со знаком минус. Запирающие импульсы напряжения, подаваемые на затвор D-HEMT относительно истока, имеют знак минус, соответственно импульсы напряжения, подаваемые на затвор E-HEMT относительно истока, являются открывающими и имеют знак плюс. Токковый коллапс приводит к уменьшению выходной СВЧ мощности транзисторов (P_{out}) относительно величины, рассчитанной по данным статической ВАХ из-за ловушек, которые не успевают перезаряжаться вслед за СВЧ сигналом:

$$P_{out} = \frac{I_{D\max} \cdot (U_{DS\text{break}} - U_{DS\text{sat}})}{8}$$

Здесь $I_{D\max}$ — ток насыщения транзистора, $U_{DS\text{sat}}$, $U_{DS\text{break}}$ — напряжение сток-исток, при котором I_D насыщается и транзистор пробивается соответственно.

На рис. 5 приведены типичные ВАХ нормально закрытого SiN/AlN/GaN-транзистора с однополярным питанием и серийного D-HEMT типа „Triquint TGF2023“, изме-

ренные в импульсном режиме из различных точек покоя. Длительность импульса U_{DS} составила $t_{DS} = 1$ мкс, а измерения проводились в течение $t_{meas} = 0.2$ мкс на участке 0.5–0.7 мкс. Напряжение U_{GS} подавалось на 1.5 мкс раньше и снималось на 1.5 мкс позже относительно U_{DS} . Из полученных импульсных ВАХ следует, что коллапс тока в E-HEMT при зарядке всех состояний под затвором и между затвором и стоком транзистора составил $\sim 2\%$, а в измеренном нами серийном транзисторе типа „Triquint TGF2023“ при зарядке состояний только между затвором и стоком транзистора коллапс тока составил более 30%. Практическое отсутствие токового коллапса в E-HEMT мы связываем с успешной пассивацией медленных поверхностных состояний слоем нитрида кремния и отсутствием ловушек в буферном слое ГЭС. Следует также отметить однородность параметров ГЭС. При измерении транзисторов в разных местах двухдюймовой пластины отличий тока насыщения, крутизны и пробивных напряжений практически не было.

5. Заключение

В работе выполнено численное моделирование AlN/GaN-гетероструктур (ГЭС), рассчитаны зависимости концентрации и подвижности двумерных электронов от толщины тонкого псевдоморфного барьера AlN. Затем выполнено моделирование полевых транзисторов с барьером Шоттки на основе AlN/GaN-ГЭС, определена толщина барьера (3–4 нм), при которой происходит изменение типа транзистора с нормально-открытого на нормально-закрытый. Разработана МЛЭ технология роста AlN/GaN-ГЭС для нормально закрытых транзисторов. Развита технология пассивации поверхности ГЭС тонкой (~ 1 нм) пленкой Si_3N_4 в камере роста. Подвижность двумерных электронов в SiN/AlN/GaN-гетероструктуре при комнатной температуре составила $\mu = 1200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при концентрации электронов $n_e = 1.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. На выращенной ГЭС сформированы нормально-закрытые транзисторы. Для их создания не потребовалось использовать специальные постростовые обработки ГЭС. Закрытые транзисторы получились за счет реализации конструкции ГЭС, обеспечившей необходимую близость канала транзистора к затвору. Удельная крутизна нормально закрытого транзистора с шириной затвора 200 мкм составила 350 мС/мм, пробивное напряжение 60 В. Установлено практическое отсутствие токового коллапса транзистора, которое мы связываем с успешной компенсацией поверхностных ловушек электронов диэлектриком, нанесенным в ростовой камере и малой концентрацией подобных ловушек в слоях ГЭС.

Работа поддержана Министерством образования и науки России (соглашение о субсидии № 14.578.21.0062 от 20.10.2014, уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57814X0062).

Список литературы

- [1] F. Medjdoub. Gallium Nitride (GaN) Physics, Devices, and Technology (CRC Press, Taylor and Francis Group 2016).
- [2] Y. Yue, J. Guo, B. Sensale-Rodriguez, G. Li, R. Wang, F. Faria, T. Fang, B. Song, X. Gao, S. Guo, T. Kosel, G. Snider, P. Fay, D. Jena, H. Xing. IEEE Electron Dev. Lett., **33**, 988 (2012).
- [3] Y. Yue, Z. Hu, J. Guo, B. Sensale-Rodriguez, G. Li, R. Wang, F. Faria, B. Song, X. Gao, S. Guo. Jpn. J. Appl. Phys., **52** (1), 08JN14 (2013).
- [4] A. Deen, D.F. Storm, D.J. Meyer, R. Bass, S.C. Binari, T. Gougousi, K.R. Evans. Appl. Phys. Lett., **105**, 093503 (2014).
- [5] D. Meyer, D.A. Deen, D.F. Storm, M.G. Ancona, D.S. Katzer, R. Bass, J.A. Roussos, B.P. Downey, S.C. Binari, T. Gougousi, T. Paskova, E.A. Preble, K.R. Evans. IEEE Electron Dev. Lett., **34**, 199 (2013).
- [6] T. Zimmermann. IEEE Electron Dev. Lett., **29**, 661 (2008).
- [7] K. Shinohara, D. Regan, A. Corrión, D. Brown, Y. Tang, J. Wong, G. Candia, A. Schmitz, H. Fung, S. Kim, M. Micovic. Electron Devices Meeting Tech. Dig. (IEDM 2012), 27.2.1 (2012).
- [8] K. Shinohara, D. Regan, I. Milosavljevic, A.L. Corrión, D.F. Brown, P.J. Willadsen, C. Butler, A. Schmitz, S. Kim, V. Lee, A. Ohoka, P.M. Asbeck, M. Micovic. IEEE Electron Dev. Lett., **32**, 1074 (2011).
- [9] F. Medjdoub, M. Zegaoui, D. Ducatteau, N. Rolland, P.A. Rolland. IEEE Electron Dev. Lett., **32**, 874 (2011).
- [10] N. Herbecq, I. Roch-Jeune, N. Rolland, D. Visalli, J. Derluyn, S. Degroote, M. Germain, F. Medjdoub. Appl. Phys. Express, **7** (3), 034103 (2014).
- [11] C.Y. Chang, S.J. Pearton, C.F. Lo, F. Ren, I.I. Kravchenko, A.M. Dabiran, A.M. Wowchak, B. Cui, P.P. Chow. Appl. Phys. Lett., **94**, 263505 (2009).
- [12] A. Endoh, Y. Yamashita, K. Ikeda, M. Higashiwaki, K. Hikosaka, T. Matsui, S. Hiyamizu, T. Mimura. Jpn. J. Appl. Phys., **43** (4B), 2255 (2004).
- [13] J. Moon, W. Shihchang, D. Wong I. Milosavljevic, A. Conway, P. Hashiwoto, M. Hu, M. Antcliffe, M. Micovic. IEEE Electron Dev. Lett., **26** (6), 348 (2005).
- [14] J.W. Chung, W.E. Hoke, E.M. Chumbes, T. Palacios. IEEE Electron Dev. Lett., **31**, 195 (2010).
- [15] X. Hu, G. Simin, J. Yang, M.A. Khan, R. Ciaska, M.S. Shur. IEEE Electron Lett., **36** (13), 753 (2000).
- [16] Y. Cai, Y. Zhou, K.M. Lau, K.J. Chen. IEEE Trans. Electron Dev., **53** (9), 2207 (2006).
- [17] M. Kuroda, H. Ishida, T. Ueda, T. Tanaka. J. Appl. Phys., **102**, 093703 (2007).
- [18] К.К. Абгарян, Д.Л. Ревизников. ЖВМ и МФ, **1**, 155 (2016).
- [19] К.К. Abgaryan, I.V. Mutigullin, D.L. Reviznikov. Phys. Status Solidi C, **12** (12), 1376 (2015).
- [20] A. Slepko, J. Ramdani, A.A. Demkov. J. Appl. Phys., **113**, 013707 (2013).
- [21] C.G. Van de Walle, J. Neugebauer. Nature, **423**, 626 (2003).
- [22] Yu Cao, D. Jena. Appl. Phys. Lett., **90**, 182112 (2007).
- [23] Д.Ю. Протасов, Т.В. Малин, А.В. Тихонов, А.Ф. Цацульников, К.С. Журавлев. ФТП, **47** (1), 36 (2013).
- [24] В.Г. Тихомиров, В.Е. Земляков, В.В. Волков, Я.М. Парнес, В.Н. Вьюгинов, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, Е.Е. Заварин, А.Ф. Цацульников, Н.А. Черкашин, М.Н. Мизеров, В.М. Устинов. ФТП, **50**, 245 (2016).
- [25] S. Vitanov, V. Palankovski, S. Maroldt, R. Quay. Sol. Electron, **54**, 1105 (2010).

- [26] J.R. Shealty, T.R. Prunty, E.M. Chumbes, B.K. Ridley. *J. Cryst. Growth*, **250** (1–2), 7 (2003).
- [27] R. Swain, K. Jena, T.R. Lenka. *ФТП*, **50**, 388 (2016).
- [28] K. Zhuravlev, T. Malin, S. Trubina, S. Erenburg, L. Dobos, B. Pecz, V. Davydov, A. Smirnov, R. Kyutt. *Phys. Status Solidi C*, **10** (3), 311 (2013).
- [29] K. Zhuravlev, I. Alexandrov, T. Malin, V. Mansurov, S. Trubina, S. Erenburg, L. Dobos, B. Pecz. *Int. Conf. on Manipulation, Manufacturing & Measurement on the Nanoscale (3M-NANO, Taiwan, Taipei, 2014)* p. 100 (2014).
- [30] К.С. Журавлев, Т.В. Малин, В.Г. Мансуров, В.Е. Земляков, В.И. Егоркин, Я.М. Парнес. 25-я Междунар. конф. „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“ (Севастополь, Крым, Россия, 2015) т. 2, с. 598 (2015).
- [31] D. Briggs, M.P. Seah. *Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy* (Wiley, N.Y., 1983) p. 187.
- [32] G. Meneghesso, G. Verzellesi, F. Danesin, F. Rampazzo, F. Zanon, A. Tazzoli, M. Meneghini, E. Zanoni. *IEEE Dev. Mater. Reliability*, **8** (2), 332 (2008).

Редактор Г.А. Оганесян

SiN/AlN/GaN heterostructures for normally-off transistors

K.S. Zhuravlev^{1,2}, T.V. Malin¹, V.G. Mansurov¹,
O.E. Tereshenko^{1,2}, K.K. Abgaryan³, D.L. Reviznikov³,
V.E. Zemlyakov⁴, V.I. Egorkin⁴, Ya.M. Parnes⁵,
V.G. Tikhomirov⁵, I.P. Prosvirin⁶

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia

³ Dorodnicyn Computing Centre,
Federal Research Center
„Computer Science and Control“
of Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

⁴ National Research University
of Electronic Technology „MIET“,
124498 Zelenograd, Moscow, Russia

⁵ CJSC „Svetlana-Electronpribor“,
194156 Saint Petersburg, Russia

⁶ Boreskov Institute of Catalysis Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Design of AlN/GaN heterostructure with ultra thin AlN barrier for enhancement-mode field-effect transistors has been modeled. Molecular beam technology of *in situ* passivated SiN/AlN/GaN heterostructures with two-dimensional electron gas has been developed. Enhancement-mode transistors with a maximum drain current of 1 A/mm, a saturation voltage of 1 V, a maximum transconductance of 350 mS/mm, a breakdown voltage of 60 V were demonstrated. The gate lag and drain lag effects are negligibly small for these devices.