

ВЛИЯНИЕ ВТОРОГО БАРЬЕРНОГО СЛОЯ AlGaN НА ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ НЕМТ

© А. Н. Максимов, А. А. Краснов, А. И. Ивашко, А. П. Ледовских, М. М. Крымко, С. В. Корнеев, В. Ф. Синкевич

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Мощные транзисторы на широкозонных полупроводниках находят широкое применение в системах преобразования и коммутации электроэнергии. Однако процессы деградации и факторы, влияющие на их надёжность и электрические характеристики, изучены не в полной мере. В работе рассмотрены вопросы повышения предельно допустимого напряжения на стоке транзисторов на основе гетероструктур AlGaN/GaN за счёт введения второго барьерного слоя AlGaN.

Ключевые слова: GaN – нитрид галлия, спонтанная и пьезоэлектрическая поляризация, контакт Шоттки, затвор, буферный и барьерный слой

Сведения об авторах: Максимов Анатолий Нестерович; Краснов Андрей Андреевич, a_krasnov_a@mail.ru; Ивашко Артём Игоревич, аспирант, ivashko_ai@pulsarnpp.ru; Ледовских Антон Павлович; Крымко Михаил Миронович, к.т.н., krymko@pulsarnpp.ru; Корнеев Сергей Викторович, korneev@pulsarnpp.ru; Синкевич Владимир Фёдорович, д.т.н., профессор, sinkevich@pulsarnpp.ru

THE IMPACT OF THE SECOND BARRIER LAYER AlGaN ON THE PARAMETERS OF THE POWER HEMT

A. N. Maksimov, A. A. Krasnov, A. I. Ivashko, A. P. Ledovskikh, M. M. Krymko, S. V. Korneev, V. F. Sinkevich

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

Wide bandgap semiconductor-based power transistors are widely used in systems of electrical conversion. However, the degradation processes and factors affecting transistors reliability and electric parameters are not fully studied. The paper considers the issues of improving the maximum breakdown voltage at the drain of transistors based on AlGaN/GaN heterostructures due to the introduction of the second AlGaN barrier layer.

Keywords: GaN – Gallium Nitride, spontaneous and piezoelectric polarization, the Schottky contact, gate, the buffer and the barrier layer

Data of authors: Maksimov Anatoly Nesterovich; Krasnov Andrey Andreevich, a_krasnov_a@mail.ru; Ivashko Artem Igorevich, postgraduate, ivashko_ai@pulsarnpp.ru; Ledovskikh Anton Pavlovich; Krymko Mikhail Mironovich, Ph.D., krymko@pulsarnpp.ru; Korneev Sergey Victorovich, korneev@pulsarnpp.ru; Sinkevich Vladimir Fedorovich, Sc.D., Prof., sinkevich@pulsarnpp.ru

Введение

Несмотря на существенные улучшения эпитаксиальных процессов выращивания наноплёнок и технологии изготовления приборов, электрические параметры, характеристики и надёжность приборов на основе

AlGaN/GaN-структур имеют ряд ограничений, связанных с наличием различных механизмов отказов при высоких напряжениях на стоке. Среди этих механизмов наиболее выражены деградация контакта Шоттки при обратном напряжении на затворе

и пробой сток-исток. Дegrаdация контакта Шоттки связана с увеличением тока утечки затвора из-за понижения высоты барьера при высоких обратных напряжениях, приводящих к инжекции носителей из металла в полупроводник, а увеличение обратного тока стока, идентифицируемого как пробой, часто обусловлено инжекцией электронов из обеднённой области гетероструктуры под обратносмещённым барьером Шоттки [1]. Одним из способов повышения устойчивости к таким видам отказов является введение в структуру транзисторов второго барьерного слоя AlGaN. В работе рассмотрено влияние второго барьерного слоя AlGaN на устойчивость транзисторов к рассмотренным выше механизмам отказов.

Теория

Пробой в транзисторах на основе GaN во многих случаях инициируется током электронов, находящихся в обеднённой области структуры, расположенной под обратносмещённым затвором транзистора, и протекающих через изолирующий буферный слой к истоку. Этот эффект проникновения электронов в буферный слой вызывает увеличение токов утечки стока и приводит к пробую [2-5]. В стандартных гетероэпитаксиальных слоях для транзисторов на основе $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ электроны хорошо удерживаются на верхней стороне канала барьерным слоем $Al_xGa_{1-x}N$. Однако в транзисторах на основе $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ только с GaN-буферным слоем этого недостаточно, чтобы удержать электроны с нижней стороны канального слоя, которые могут увеличивать токи утечки стока даже при низком значении обратного напряжения на стоке и закрытом канале. Этого можно избежать введением *p*-типа примесей в GaN-буферный слой, путём увеличения количества акцепторного типа ловушек или использованием второго ненапряжённого барьерного слоя $Al_yGa_{1-y}N$ с целью удержания электронов в канальном слое GaN с нижней стороны. На рис. 1 схематично показана структура транзистора с двумя барьерными слоями AlGaN. Введение второго барьерного слоя AlGaN приводит к

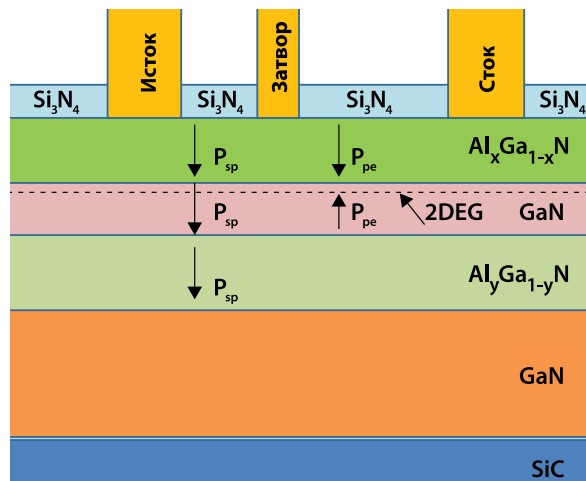


Рис. 1

Структура транзистора с двумя барьерными слоями AlGaN

изменению поляризационных воздействий в гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$.

Под воздействием механических напряжений, возникающих в процессе роста наноплёнок, постоянные кристаллической решётки будут отличаться от идеальных. Кристаллическая решётка, приспособиваясь к этим напряжениям, будет изменять направление и значения поляризационных воздействий, которые, в свою очередь, будут изменять направление и величину внутренних электрических полей в каждой наноструктуре.

Поляризация в полупроводниках семейства III-N с кристаллической решёткой типа вюрцит характеризуется двумя компонентами – спонтанной и пьезоэлектрической поляризацией. На рис. 2 схематично показана кристаллическая структура GaN.

При сжатии постоянная решётки a_0 будет уменьшаться, а при растяжении – увеличиваться. Следовательно, в зависимости от направления воздействия будет изменяться значение и направление пьезоэлектрической поляризации. Выражение для пьезоэлектрической поляризации имеет вид [6]:

$$P_{pe} = 2(a - a_0) [e_{31} - e_{33}^* C_{13}/C_{33}], \quad (1)$$

где a – постоянная кристаллической решётки при воздействии механических напряжений (растяжение, сжатие); a_0 – посто-

янная идеальной кристаллической решётки; e_{31} и e_{33} – пьезоэлектрические коэффициенты ($e_{31} = -0,36 \text{ К/м}^2$, $e_{33} = 0,73 \text{ К/м}^2$) [6]; C_{13} и C_{33} – постоянные упругости.

Поскольку для полупроводников семейства III-N с кристаллической решёткой типа вюрцит пьезоэлектрический коэффициент e_{31} всегда отрицателен, а e_{33} всегда положителен [6], то при растяжении ($a > a_0$) выражение (1) будет отрицательным, а при сжатии ($a < a_0$) – положительным.

Спонтанная поляризация всегда отрицательна и равна $P_{sp} = -0,034 \text{ К/м}^2$ [6]. При растяжении спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации направлены в одну сторону и значение суммарной поляризации отрицательное. При сжатии пьезоэлектрическая поляризация направлена противоположно спонтанной и суммарная поляризация равна их разности. Верхний слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, выращенный на Ga-плоскости, всегда находится под растягивающим напряжением, и в этом случае спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации направлены в одну сторону и имеют отрицательное значение.

В транзисторе со вторым барьерным слоем канал отделён от буферного слоя GaN структурой типа $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$. При этом верхний барьерный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с большим содержанием Al подвержен усилию двуосного растяжения и имеет постоянную

решётки (a) больше, нежели при отсутствии напряжений (a_0), и, следовательно, спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации в этом слое направлены в одну сторону.

Поскольку верхний слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ подвержен усилию двуосного растяжения, то каналный слой GaN находится под воздействием двуосного сжатия, которое с увеличением мольной доли Al в обратном барьерном слое $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ становится больше и, следовательно, постоянная решётки (a_0) каналного слоя GaN становится меньше. При этом в каналном слое GaN спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации направлены противоположно друг другу. Суммарная поляризация в ненапряжённом толстом буферном слое $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ определяется только спонтанной поляризацией, а пьезоэлектрическая равна нулю. Поверхностная плотность заряда на границе раздела $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{GaN}$ и $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ определяется разностью поляризаций в этих слоях.

$$\sigma = (P_{sp\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}} + P_{pe\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}} + P_{sp\text{GaN}} + P_{pe\text{GaN}}) - (P_{sp\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}} + P_{pe\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}). \quad (2)$$

Так как пьезоэлектрическая поляризация во втором барьерном слое $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ равна нулю, то выражение (2) примет вид:

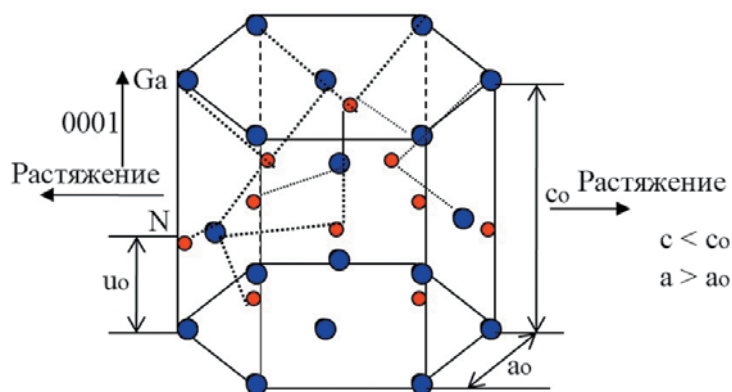


Рис. 2

Схематичное изображение кристаллической структуры GaN (a_0 и c_0 – постоянные кристаллической решётки при отсутствии напряжений, a и c – изменение постоянных кристаллической решётки под воздействием механических напряжений)

$$\bar{\sigma} = (P_{spAl_yGa_{1-y}N} + P_{spGaN} + P_{peGaN}) - (P_{spAl_xGa_{1-x}N} + P_{peAl_xGa_{1-x}N}). \quad (3)$$

Поскольку $P_{spAl_yGa_{1-y}N}$, $P_{spAl_xGa_{1-x}N}$, P_{spGaN} , $P_{peAl_xGa_{1-x}N}$ имеют отрицательное значение, а P_{peGaN} – положительное, то заряд на границе раздела GaN/Al_yGa_{1-y}N будет отрицательным.

Внутреннее электрическое поле без внешнего воздействия для подложек с обратным барьерным слоем Al_yGa_{1-y}N меньше по сравнению с обычным буферным слоем GaN при одних и тех же условиях. Это обусловлено снижением значения пьезоэлектрической поляризации из-за её положительного направления в канальном слое GaN, модификацией зонной структуры при наличии обратного барьерного слоя Al_yGa_{1-y}N и наличием отрицательного заряда на границе раздела GaN/Al_yGa_{1-y}N.

Введение обратного барьерного слоя Al_yGa_{1-y}N приводит к скачкообразному увеличению высоты барьера в зоне проводимости и лучшему удерживанию электронов в канальном слое GaN. Электроны из канального слоя не могут распространяться в буферный слой при высоком напряжении на стоке, и вследствие этого увеличивается напряжение пробоя транзистора, и снижаются токи утечки стока. На рис. 3 представлено моделирование процесса распространения электронов в глубь структу-

ры транзистора с буферным слоем GaN и для структуры транзистора с нижним барьерным слоем Al_yGa_{1-y}N. Результат моделирования показывает, что для структуры транзистора без обратного барьерного слоя Al_yGa_{1-y}N электроны легко распространяются в буферный слой и их плотность довольно высокая, а для структуры, представленной на рис. 1, электроны хорошо удерживаются в канальном слое GaN.

На рис. 4 показаны результаты моделирования зонной диаграммы структуры транзистора со вторым барьерным слоем Al_yGa_{1-y}N, в которой наблюдается скачкообразное увеличение высоты барьера в зоне проводимости на границе раздела GaN/Al_yGa_{1-y}N.

Наличие толстого обратного барьерного слоя Al_yGa_{1-y}N приводит к снижению растягивающих напряжений в верхнем барьерном слое Al_xGa_{1-x}N и, следовательно, к понижению отрицательного значения пьезоэлектрической поляризации. Из-за снижения растягивающих напряжений в верхнем барьерном слое под материалом затвора происходит локальное снижение электрического поля в затворной области (рис. 5). В открытом состоянии это обуславливает более низкую плотность электронов в канале. Это означает, что для таких приборов за счёт влияния пьезоэлектрической поляризации, направленной в обратном направ-

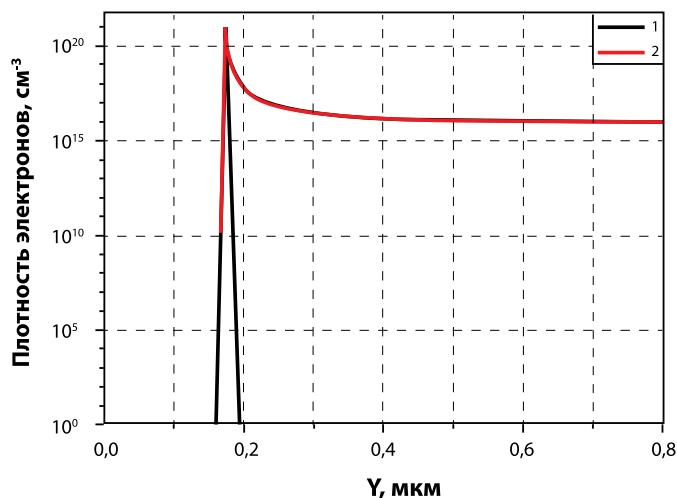


Рис. 3

Зависимость распространения электронов: 1 – с барьерным слоем Al_yGa_{1-y}N; 2 – только с буферным слоем GaN

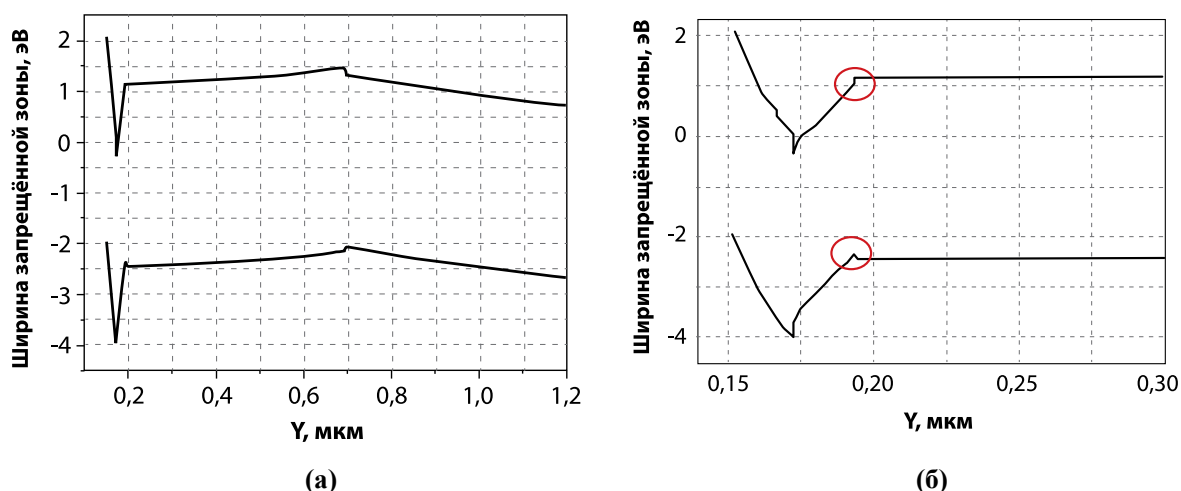


Рис. 4

Модификация зонной диаграммы (ширины запрещённой зоны) структуры $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$: а) ширина запрещённой зоны; б) скачкообразное увеличение зоны проводимости на границе раздела $GaN/Al_yGa_{1-y}N$

лении в канальном слое GaN, могут быть приложены более высокие напряжения на стоке до возникновения инжекции электронов из области обеднения под затвором в буферный слой $Al_yGa_{1-y}N$. На рис. 5 представлены результаты моделирования электрического поля вдоль канала в транзисторе со структурой, показанной на рис. 1.

Результаты моделирования показывают, что напряжение на стоке оказывает сильное влияние на высоту потенциального барьера между $Al_yGa_{1-y}N/GaN$. При значительном увеличении напряжения на стоке потенциальный барьер между

$Al_yGa_{1-y}N/GaN$ снижается настолько, что электроны могут проникать в буферный слой, вызывая пробой между стоком и истоком. Электроны, инжектированные в буферный слой $Al_yGa_{1-y}N$, двигаются к омическому контакту стока. При этом, попадая в обеднённую область под стоком, они повышают напряжённость электрического поля, что в итоге приводит к пробую.

На рис. 6 и 7 представлены результаты моделирования влияния электрического поля стока на изменение зоны проводимости и распределение плотности электронов в структуре транзистора. При напряжении

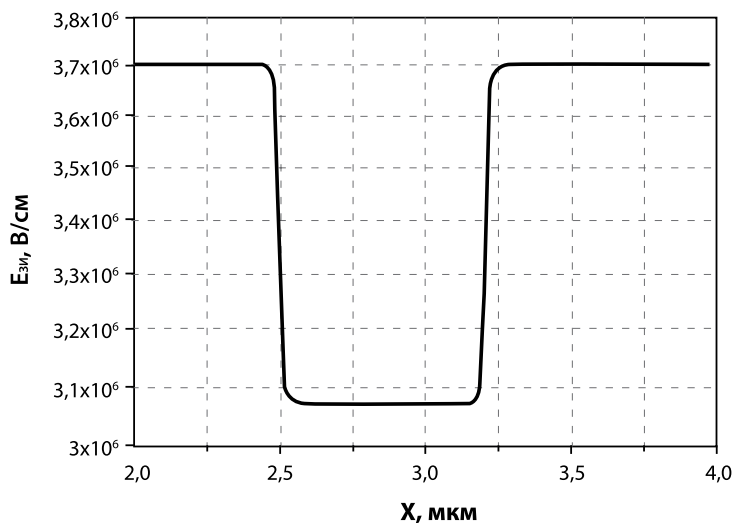


Рис. 5

Напряжённость электрического поля под затвором для структуры с двумя слоями AlGaN

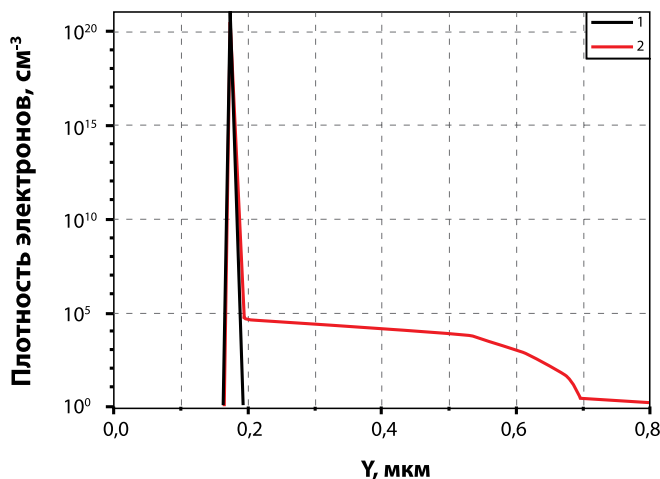


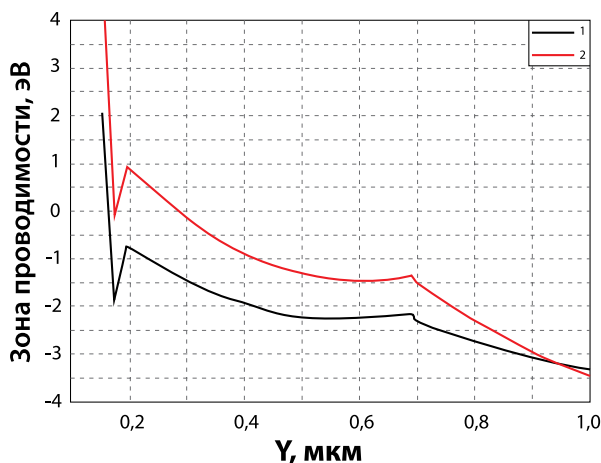
Рис. 6

Влияние поля стока на распределение плотности электронов в канальном слое GaN:
 1 – напряжение на стоке $U_{ds} = 0$ В, $U_{gs} = 0$ В; 2 – напряжение на стоке $U_{ds} = 20$ В, $U_{gs} = 0$ В

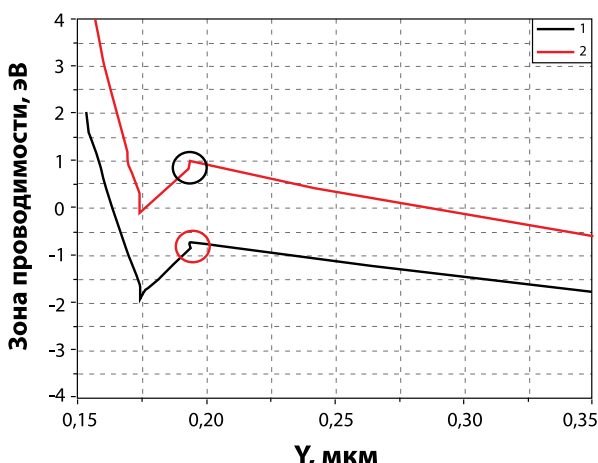
$U_{ds} = 20$ В наблюдается незначительное увеличение плотности электронов в буферном слое. Это происходит из-за снижения высоты барьера зоны проводимости на границе раздела GaN/ $Al_yGa_{1-y}N$ (рис. 6). При напряжении на затворе $U_{gs} = 0$ В и $U_{ds} = 20$ В квантовая яма заполнена электронами, и при преодолении барьера зоны проводимости они могут легко двигаться в сторону объемного буферного слоя $Al_yGa_{1-y}N$. При напряжении на затворе $U_{gs} = -3,0$ В, $U_{ds} = 20$ В электроны в квантовой яме отсутствуют (рис. 7).

Эксперимент

Исследования проводились на транзисторах, изготовленных на гетероструктурах с двумя барьерными слоями AlGaN и канальным слоем GaN, выращенными на полупроводниковой подложке SiC. Затвор выполнен из материала Ni/Au, а омические контакты – из соединения Ti/Al/Ni/Au. На транзисторные структуры наносился защитный слой диэлектрика Si_3N_4 . Структура транзистора показана на рис. 1. Длина затвора составляла 0,7 мкм, ширина – 200 мкм.



(а)



(б)

Рис. 7

Изменение зоны проводимости под воздействием поля стока: а) изменение зоны проводимости; б) снижение высоты барьера зоны проводимости на границе раздела GaN/ $Al_yGa_{1-y}N$ под действием поля стока $U_{gs} = -3,0$ В, $U_d = 20$ В (1 – напряжение на затворе $U_{gs} = 0$ В, $U_{ds} = 20$ В; 2 – напряжение на затворе $U_{gs} = -3,0$ В, $U_{ds} = 20$ В)

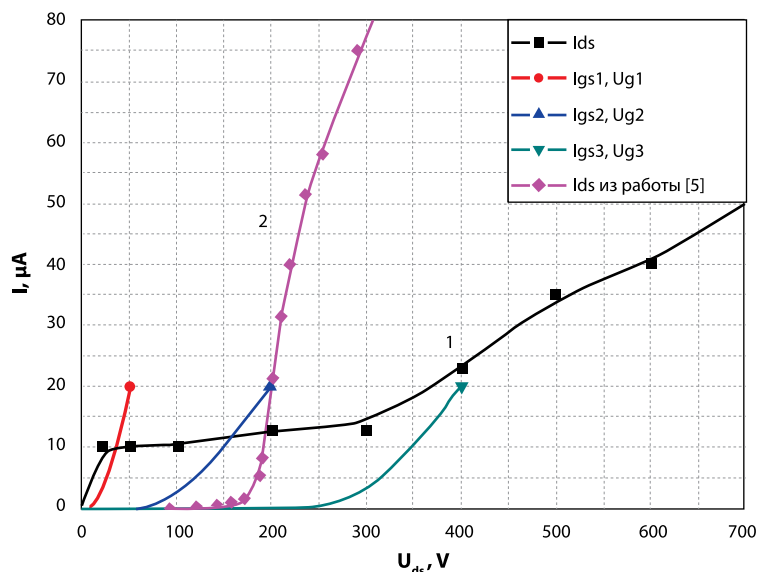


Рис. 8

Зависимость тока утечки затвора от напряжения на стоке ($U_{gs1} = -3,86$ В, $U_{gs2} = -4,32$ В, $U_{gs3} = -4,37$ В) и зависимость тока стока от напряжения на стоке для структуры со вторым барьерным слоем $Al_yGa_{1-y}N$ (1) и для структуры с буферным слоем GaN (2)

При закрытом транзисторе контакт Шоттки (затвор) находится при высоком отрицательном обратном напряжении, к стоку тоже приложено высокое положительное обратное напряжение. Такой режим может приводить к деградации контакта Шоттки, то есть к увеличению тока утечки затвора. Измерения проводились следующим образом.

Вначале подавалось отрицательное пороговое напряжение на затвор, а затем положительное напряжение на сток. При напряжении на стоке 50 В наблюдалось появление тока утечки затвора. При увеличении запирающего напряжения на затворе на 0,15 В подпороговый ток утечки затвора подавлялся и появлялся снова при напряжении на стоке 200 В. При дальнейшем увеличении отрицательного напряжения на затворе на 0,2 В утечка тока затвора исчезала, а обратное напряжение на стоке достигало более 400 В. При напряжении на стоке 500 В и напряжении на затворе -4,4 В транзистор необратимо деградировал из-за резкого (не лавинного) увеличения тока стока.

На рис. 8 показаны зависимость тока утечки затвора от обратного напряжения на стоке и сравнение зависимостей токов стока от напряжения на стоке для структуры

со вторым барьерным слоем $Al_yGa_{1-y}N$ (1) и для структуры с буферным слоем GaN (2).

При напряжении на затворе $U_{gs} = -4,37$ В практически полностью подавлен ток утечки затвора. Отсутствие тока утечки позволило достичь величины обратного напряжения на стоке 500 В. Отказ транзистора был вызван током утечки обратносмещённого перехода затвор-исток из-за наличия поверхностных состояний, генерирующих значительные поверхностные токи проводимости, и инжекции электронов из металла затвора в полупроводник при понижении барьера Шоттки. При больших значениях поверхностных токов рассеиваемая мощность могла достичь критического уровня и привести к возникновению теплового пробоя.

При более высоком запирающем напряжении на затворе $U_{gs} = -5$ В обратное напряжение на стоке транзистора увеличивалось, и при напряжении 700 В он необратимо деградировал. Отказ транзистора был связан с началом ударной ионизации в области стока и встречной инжекцией электронов из истока из-за снижения высоты барьера зоны проводимости между $Al_yGa_{1-y}N/GaN$. Измерения параметров транзисторов при повышенной температуре (130 °С) показали отказ, связанный с возникновением пробоя

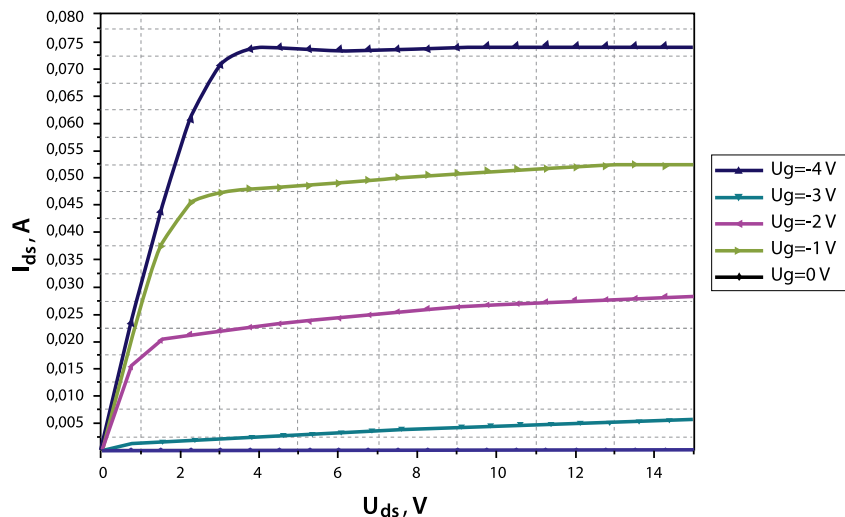


Рис. 9

ВАХ транзистора с $W_{\text{затвора}} = 200 \text{ мкм}$

между стоком и истоком и поверхностной проводимостью между затвором и стоком из-за значительных поверхностных токов. При этом напряжение пробоя на стоке составляло $U_{\text{ds}} = 400 \text{ В}$, а напряжение на затворе $U_{\text{gs}} = -6 \text{ В}$. Этот механизм сопровождается образованием узкого шнура тока. Эти механизмы отказов подробно описаны в [7, 8].

На рис. 9 представлены вольтамперные характеристики (ВАХ) транзистора. Видно, что максимальный ток стока на единицу ширины транзистора составляет $I_{\text{симакс}} = 0,37 \text{ А/мм}$, сопротивление открытого транзистора $0,41 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$, пороговое напряжение $U_{\text{пор}} = -4 \text{ В}$.

На рис. 10 приведена структура транзистора после возникновения отказов, вы-

званных пробоем, образованием шнура тока и миграцией металлизации от стока к затвору и истоку.

Выводы

В работе показано, что наличие второго барьерного слоя $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ приводит к снижению растягивающих напряжений в верхнем барьерном слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и под материалом затвора, а значит – к локальному снижению электрического поля под областью затвора, что и обусловило понижение плотности тока стока, которая составила $0,37 \text{ А/мм}$.

Удержание электронов в канальном слое GaN вторым барьерным слоем $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$

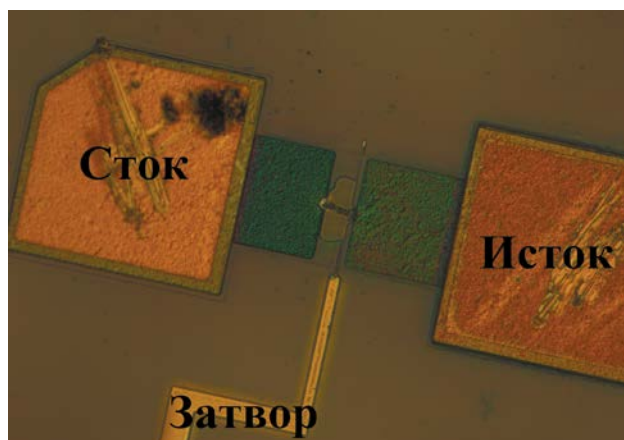


Рис. 10

Инжекционный пробой, «канал» протекания тока от стока к затвору и миграция металла затвора

позволило увеличить допустимое обратное напряжение на стоке до 700 В, вызвав инжекционный пробой, связанный с понижением высоты барьера между нижним слоем $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ и канальным слоем GaN, попаданием электронов в буферный слой и началом ударной ионизации в области стока.

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
2. Lidow Alex GaN transistors for efficient power conversion. Willey, 2015, 247 p.
3. Germain M. GaN-on-Si for power conversion / 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 and G. Borghs // CS MANTECH Conference, May 17th-20th, 2010, Portland, Oregon, USA.
4. Würfl J. High voltage normally-off transistors and efficient Schottky diodes based on GaN technology / J. Würfl, E. Bahat-Treidel, F. Brunner, M. Cho, O. Hilt, A. Knauer, P. Kotara, M. Weyers, R. Zhytnytska // 220th ECS Meeting, 2011. The Electrochemical Society.
5. Gallium Nitride (GaN): Physics, Devices, and Technology / Edited by Farid Medjoub, by Taylor & Francis Group LLC, 2016, 472 p.
6. Rudiger Quay Gallium Nitride Electronics // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 471 p.
7. Vashenko V. A., Sinkevich V. F. Physical limitations of semiconductor devices // Springer, 2008, 330 p.
8. Isothermal current instability and local breakdown in GaAs FET / N. A. Kozlov, V. F. Sinkevich, V. A. Vashenko // Electronics Letters, 1992, T. 28, № 13, pp. 1265-1267.

References

1. Zi S. *Fizika poluprovodnikovykh priborov* [Physics of semiconductor devices]. Moscow, Mir Publ., 1984, 456 p.
2. Lidow Alex GaN transistors for efficient power conversion. Willey, 2015, 247 p.
3. Germain M. GaN-on-Si for power conversion / 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 and G. Borghs // CS MANTECH Conference, May 17th-20th, 2010, Portland, Oregon, USA.
4. Würfl J. High voltage normally-off transistors and efficient Schottky diodes based on GaN technology / J. Würfl, E. Bahat-Treidel, F. Brunner, M. Cho, O. Hilt, A. Knauer, P. Kotara, M. Weyers, R. Zhytnytska // 220th ECS Meeting, 2011. The Electrochemical Society.
5. Gallium Nitride (GaN): Physics, Devices, and Technology / Edited by Farid Medjoub, by Taylor & Francis Group LLC, 2016, 472 p.
6. Rudiger Quay Gallium Nitride Electronics // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 471 p.
7. Vashenko V. A., Sinkevich V. F. Physical limitations of semiconductor devices // Springer, 2008, 330 p.
8. Isothermal current instability and local breakdown in GaAs FET / N. A. Kozlov, V. F. Sinkevich, V. A. Vashenko // Electronics Letters, 1992, T. 28, № 13, pp. 1265-1267.