УДК 621.382.3

DOI:10.36845/2073-8250-2020-256-1-4-16

ОБРАЗОВАНИЕ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА (ДЕГ) В СТРУКТУРЕ С ДВУМЯ БАРЬЕРНЫМИ СЛОЯМИ $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$

А.Н. Максимов

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

В работе рассмотрены характеристики гетероструктур $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$, спонтанная и пьезоэлектрическая поляризации, индуцирующие ДЕГ (двумерный электронный газ). Определены поверхностная плотность заряда и поверхностная концентрация носителей в канале. Установлено влияние содержания молярных долей Al в верхнем и нижнем барьерных слоях на величину поверхностной плотности заряда. При изменении концентрации молярных долей Al в верхнем барьерном слое от 15 до 40 заметно увеличение поверхностной концентрации носителей $n_s(x)$. При изменении концентрации молярных долей Al в нижнем барьерном слое от 0.05 до 0.12 заметно снижение поверхностной концентрации n_s носителей. Рассмотрены особенности высоковольтных HEMT с двумя барьерными слоями. Введение второго барьерного слоя приводит к лучшему удержанию электронов в канальном слое GaN, но при этом происходит снижение максимальной плотности концентрации носителей (ДЕГ) в канале и сдвиг порогового напряжения в положительную сторону.

Ключевые слова: спонтанная поляризация, пьезоэлектрическая поляризация, двумерный электронный газ (ДЕГ), нитрид галлия (GaN), HEMT – транзистор с высокой подвижностью электронов

Сведения об авторах: Максимов Анатолий Нестерович, maksimov_an@pulsarnpp.ru

FORMATION OF THE TWO-DIMENSIONAL ELECTRON GAS (2DEG) IN THE STRUCTURE WITH TWO $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$ BARRIER LAYERS

A.N. Maksimov

“S&PE Pulsar” JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

This article is dedicated to the study of $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$ heterostructures and spontaneous and piezoelectric polarizations, which induces 2DEG. In this research the surface charge density, the surface concentration of carriers in the channel and the relationship between the amount of Al molar fractions in upper and lower barrier layers and the surface charge density were determined. Change in the concentration of Al mole fractions in the upper barrier layer from 15 to 40, causes noticeable increase in the surface concentration of carriers $n_s(x)$. Change in the concentration of Al mole fractions in the lower barrier layer from 0.05 to 0.12, causes noticeable decrease in the surface concentration of n_s carriers. The features of high-voltage HEMT with two barrier layers were considered. The introduction of the second barrier layer leads to a better electron confinement in the GaN channel, but at the same time, the maximum carrier density (2DEG) in the channel decreases and the voltage threshold shifts to the positive side.

Keywords: spontaneous polarization, piezoelectric polarization, two-dimensional electron gas (2DEG), gallium nitride (GaN), HEMT

Data on author: Maksimov Anatoly Nesterovich, maksimov_an@pulsarnpp.ru

Введение

Для структур нитридных соединений важно управлять как спонтанной, так и пьезоэлектрической поляризациями для получения требуемых параметров приборов. В литературе исследованы и установлены значения спонтанной поляризации для слоя GaN. Пьезоэлектрическая и спонтанная поляризации для слоя $Al_xGa_{1-x}N$ зависят от содержания молярных долей Al в этом слое и его толщины [1-6]. Для увеличения пробивного напряжения сток-исток и снижения влияния электронов, находящихся в обеднённой области под обратносмещённым затвором транзистора, используется нижний ненапряжённый барьерный слой $Al_yGa_{1-y}N$ [7].

Для определения оптимального соотношения молярных долей Al в верхнем и нижнем барьерных слоях необходимо определить природу возникновения спонтанной и пьезоэлектрической поляризации и их влияние на формирование двумерного электронного газа (ДЕГ) в зависимости от электрических и конструктивных характеристик гетероструктур $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$.

Спонтанная и пьезоэлектрическая поляризация в структуре с двумя барьерными слоями $Al_xGa_{1-x}N/GaN/Al_yGa_{1-y}N$, образование ДЕГ

Для структур нитридных соединений характерно наличие ковалентных связей. В случае ковалентной связи, когда атомы различны, степень владения обобществлённой парой электронов определяется различием в электроотрицательности атомов. Атом с большей электроотрицательностью сильнее притягивает к себе пару электронов связи, и его истинный заряд становится отрицательным. Атом с меньшей элек-

троотрицательностью приобретает такой же по величине положительный заряд, т.е. образуется полярная ковалентная связь. При этом общее электронное облако смещается в сторону атома с большей электроотрицательностью, образуя тем самым асимметрию распределения электрического заряда в молекуле.

Из-за различия в электроотрицательности между атомами Ga (1.81), Al (1.61) и атомами N (3.04) эта группа III-N полупроводников характеризуется высокой ионизацией ковалентных связей, вызывающей перераспределение электрического заряда, и представляет исключительно сильную поляризацию. Эта поляризация называется спонтанной. Во всех III-N полупроводниках, выращенных Ga-плоскостью, вектор спонтанной поляризации имеет отрицательное значение. В структуре вюрцит этот вектор параллелен оси c , а отрицательный знак говорит о том, что вектор P_{sp} направлен против этой оси. Пьезоэлектрическая поляризация основана на механической деформации кристалла III-N полупроводника и смещении анионной подрешётки (Ga) к катионной подрешётке (N). Основное различие между спонтанной и пьезоэлектрической поляризациями заключается в природе эффекта: механическое напряжение в случае пьезоэлектрической поляризации и внутренняя асимметрия распределения электрического заряда в кристалле в случае спонтанной поляризации. При отсутствии внешних электрических полей суммарная поляризация равна сумме спонтанной и пьезоэлектрической поляризаций.

Для снижения токов утечки стока и удержания электронов с нижней стороны канального слоя GaN используют второй ненапряжённый барьерный слой $Al_yGa_{1-y}N$. Введение второго барьерного слоя

$\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ приводит к изменению поляризационных воздействий в гетероструктурах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$. Под воздействием механических напряжений, возникающих в процессе роста наноплёнок, постоянные кристаллической решётки будут отличаться от идеальных. Кристаллическая решётка, приспособившись 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 [7]. Сама по себе поляризация и градиенты поляризации на границе раздела и поверхности гетероструктур индуцируют фиксированный поверхностный заряд, который вызывает сильные электрические поля внутри каждой гетероструктуры, тем самым усиливая аккумуляцию носителей на границе раздела $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$. Носи-

тели аккумулируются в основном за счёт поляризационных зарядов, расположенных вдоль гетероперехода на вершине запрещённой зоны со стороны $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. При формировании гетероперехода происходит разрыв зоны проводимости и валентной зоны. Образовавшаяся вдоль гетероперехода треугольная квантовая яма заполняется электронами, которые и называются двумерным электронным газом (ДЕГ). Выражение ДЕГ определяется условиями, когда электроны имеют квантованные уровни только в одном пространственном направлении, но перемещаются они свободно в двух других направлениях параллельно поверхности границы раздела.

На рис. 1 представлена зонная диаграмма в вюрцит-структуре, выращенной Ga-плоскостью, с двумя барьерными слоями $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ для разных мольных долей Al в верхнем барьерном слое.

Рис. 1

Зонная диаграмма в вюрцит-структуре, выращенной Ga-плоскостью, с двумя барьерными слоями $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ для разных мольных долей Al ($x_1 = 0,4$ и $x_2 = 0,15$) в верхнем барьерном слое

Введение второго барьерного слоя $Al_yGa_{1-y}N$ приводит к скачкообразному увеличению высоты барьера в зоне проводимости и лучшему удерживанию электронов в канальном слое GaN. На рис. 2 показана зависимость распространения электронов в объём структуры со вторым барьерным слоем и только с одним буферным слоем GaN.

Рис. 2

Зависимость распространения электронов в объём структуры: 1 – с барьерным слоем $Al_yGa_{1-y}N$; 2 – только с буферным слоем GaN [7]

Внутреннее электрическое поле без внешнего воздействия для подложек со вторым 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 и наличию отрицательного заряда на границе раздела GaN/ $Al_yGa_{1-y}N$.

В общем, если поляризационное поле P изменяется в пространстве, то оно будет создавать плотность заряда, связь с которым определяется выражением:

$$\rho = -\nabla P, \quad (1)$$

где ∇ – оператор Набла.

Для вюрцит III-N структур поляризация всегда направлена перпендикулярно поверхности гетероструктуры. Следова-

тельно, на гетеропереходе, который, как предполагается, должен быть планарным и резким, наводится поверхностный заряд, определяемый выражением:

$$\sigma = [P_{sp(\text{верх.слой})} + P_{pe(\text{верх.слой})}] - [(P_{sp(\text{ниж.слой})} + P_{pe(\text{ниж.слой})})]. \quad (2)$$

Поверхностная плотность заряда на границе раздела $Al_yGa_{1-y}N/GaN$ и $GaN/Al_xGa_{1-x}N$ равна разности поляризаций в слоях $Al_yGa_{1-y}N/GaN$ и $Al_xGa_{1-x}N$ и определяется выражением:

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

Так как пьезоэлектрическая поляризация во втором барьерном слое $Al_yGa_{1-y}N$ равна нулю, то выражение (3) примет вид:

$$\sigma = (P_{spAl_yGa_{1-y}N} + P_{spGaN} + P_{peGaN}) - (P_{spAl_xGa_{1-x}N} + P_{peAl_xGa_{1-x}N}). \quad (4)$$

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.

Выражение для пьезоэлектрической поляризации вдоль оси c для кристаллической структуры, показанной на рис. 3, имеет вид [8]:

$$P_{pe} = 2(a - a_0)/a_0 [e_{31} - e_{33} \cdot C_{13}/C_{33}], \quad (5)$$

где a – постоянная кристаллической решётки при воздействии механических напряжений (растяжение, сжатие); a_0 – постоянная идеальной кристаллической решётки; e_{31} и e_{33} – пьезоэлектрические коэффициенты ($e_{31} = -0,49$ К/м², $e_{33} = 0,73$ К/м²) [6]; C_{13} и C_{33} – постоянные упругости.

Поскольку для полупроводников семейства III-N с кристаллической решёткой типа вюрцит [8] пьезоэлектрический коэффициент e_{31} всегда отрицателен, а e_{33} всегда положителен, то при растяжении ($a > a_0$) выражение (5) будет отрицательным, а при сжатии ($a < a_0$) – положительным.

Рис. 3

Схематическое изображение кристаллической структуры GaN (a_0 и c_0 – постоянные кристаллической решетки при отсутствии напряжений; a и c – изменение постоянных кристаллической решетки под воздействием механических напряжений) [7]

Для вычисления вызванной поляризацией поверхностной плотности заряда на границах раздела $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ и $\text{GaN}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ в зависимости от содержания молярных долей Al в этих слоях воспользу-

емся линейной интерполяцией физических свойств структур GaN и AlN [8]:

$$a(x) = (-0,077x + 3,189)10^{-10}\text{м}; \quad (6)$$

$$C_{13}(x) = (5x + 103) \text{ ГПа}; \quad (7)$$

$$C_{33}(x) = (-32x + 405) \text{ ГПа}; \quad (8)$$

$$e_{31}(x) = (-0,11x - 0,49) \text{ К/м}^2; \quad (9)$$

$$e_{33}(x) = (0,73x + 0,73) \text{ К/м}^2; \quad (10)$$

$$P_{SP}(x) = (-0,052x - 0,029) \text{ К/м}^2. \quad (11)$$

По выражениям (5-11) рассчитаны значения спонтанной и пьезоэлектрической поляризации для различных молярных долей Al в верхнем и нижнем барьерных слоях.

Зависимости спонтанной и пьезоэлектрической поляризации в верхнем, нижнем и канальном слоях от содержания молярных долей Al представлены на рис. 4, 5.

Рис. 4

Зависимость спонтанной и пьезоэлектрической поляризации от содержания молярных долей Al в верхнем барьерном слое

Рис. 5

Зависимость спонтанной и пьезоэлектрической поляризации в нижнем барьерном слое $Al_yGa_{1-y}N$ и в канальном слое GaN от содержания молевых долей Al

Зависимость поверхностной плотности заряда от содержания молевых долей Al в верхнем и нижнем барьерных слоях представлена на рис. 6.

Рис. 6

Зависимость поверхностной плотности заряда от содержания молевых долей Al в верхнем и нижнем барьерных слоях

Зависимость поверхностной плотности заряда от содержания молярных долей Al_y на границе раздела $GaN/Al_yGa_{1-y}N$ представлена на рис. 7.

Рис. 7

Зависимость поверхностной плотности заряда от содержания молярных долей Al_y на границе раздела $GaN/Al_yGa_{1-y}N$

Очевидно, что изменения в составе гетероструктур, дефектности поверхности границы раздела или локальные изменения механических напряжений будут приводить к локальным изменениям распределения поляризации, следовательно, и к изменениям поверхностной плотности заряда. Однако суммарный поверхностный заряд, который связан с поляризацией в области границы раздела, будет очень близок к значению, определённом как на резкой почти идеальной границе раздела.

Для компенсации высокой поляризации, индуцирующей поверхностный заряд, на границе раздела $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ образуются свободные электроны (ДЕГ). Максимальная поверхностная концентрация носителей, находящаяся на этой границе раздела, определяется следующим выражением [7]:

$$n_s(x) = \frac{6(x)}{q} - \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon(x)}{dq^2} \right) [q\Phi_b(x) + E_F - \Delta E_C(x)], \quad (14)$$

где d – толщина верхнего барьерного слоя $Al_xGa_{1-x}N$; $q\Phi_b$ – высота барьера Шоттки; E_F – уровень Ферми относительно границы зоны проводимости GaN ; ΔE_C – смещение зоны проводимости $Al_xGa_{1-x}N$ на границе раздела $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ (между каналным слоем GaN и верхним барьерным слоем). Чтобы определить поверхностную концентрацию носителей за счёт наведённой поляризации поверхностной плотности заряда, воспользуемся следующей линейной аппроксимацией [8]:

$\epsilon(x) = -0,5x + 9,5$ – диэлектрическая постоянная $Al_xGa_{1-x}N$;

$q\Phi_b(x) = (1.3x + 0.84)$ eV – высота барьера Шоттки;

$\Delta E_C = 0,7[E_g(x) - E_g(0)]$ eV – смещение зоны проводимости между каналным слоем GaN и верхним барьерным слоем $Al_xGa_{1-x}N$ (на границе раздела $Al_xGa_{1-x}N/GaN$), где $E_g(x)$ – ширина запрещённой зоны структуры верхнего барьерного слоя

$Al_xGa_{1-x}N$, в зависимости от мольных долей алюминия в структуре определяемая выражением:

$$E_g(x) = x E_g(AlN) + (1 - x) E_g(GaN) - x(1 - x)1 \text{ eV}. \quad (15)$$

Зависимости ширины запрещённой зоны и смещения зоны проводимости верхнего барьерного слоя $Al_xGa_{1-x}N$ от содержания мольных долей алюминия в структуре представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

Рис. 8

Зависимость ширины запрещённой зоны структуры верхнего барьерного слоя $Al_xGa_{1-x}N$ от содержания мольных долей алюминия

Рис. 9

Зависимость смещения зоны проводимости верхнего барьерного слоя $Al_xGa_{1-x}N$ по отношению к зоне проводимости GaN от содержания мольных долей Al в верхнем барьерном слое

Зависимость поверхностной концентрации носителей в квантовой яме (ДЕГ) от содержания молевых долей Al в верхнем

и нижнем барьерных слоях при толщине верхнего барьерного слоя $d = 30$ нм представлена на рис. 10.

Рис. 10

Зависимость поверхностной концентрации носителей в квантовой яме (ДЕГ) от содержания молевых долей Al в верхнем и нижнем барьерных слоях при толщине верхнего барьерного слоя $d = 30$ нм

В таблице приведены экспериментальные значения поверхностной концентрации носителей $n_s(x)$ для производителей эпитаксиальных структур Cree (США), NTT AT (Япония), ЗАО «Элма – Малахит», Novagan (Швейцария) с толщиной верх-

него барьерного слоя $Al_xGa_{1-x}N$ $d = 30$ нм, концентрацией Al $x = 0,25$ и концентрацией Al в нижнем ненапряжённом барьерном слое $y = 0,07$ с толщиной канального слоя GaN 30 нм.

Таблица

Экспериментальные значения поверхностной концентрации носителей $n_s(x)$

Производитель гетероструктур	$n_s(x) 10^{13} \text{ см}^{-2}$	концентрация Al(x)	концентрация Al(y)
Cree (США) Подложка – SiC	0,94 – 0,98	0,25	0,07
NTT AT (Япония) подложка – SiC	0,81 – 0,87	0,25	0,07
ЗАО «Элма – Малахит» подложка – сапфир	0,96 – 1,07	0,25	0,07 – 0,09
Novagan (Швейцария) подложка – SiC	0,848 – 1,27	0,25	0,07

Значения поверхностной концентрации носителей $n_s(x)$ для производителей гетероструктур Cree, NTT AT, Novagan, ЗАО «Элма – Малахит» находятся в пределах $0,94 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} - 1,27 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что довольно хорошо совпадает с расчётными значениями $1,026 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (рис. 10) для подложек фирмы Cree и ЗАО «Элма – Малахит».

На рис. 11 представлена карта распре-

деления поверхностной концентрации носителей и их подвижности на пластине фирмы Novagan (Швейцария). Заметен значительный разброс по пластине и концентрации, и подвижности. Такой разброс поверхностной концентрации носителей и низких значений подвижности объясняется высокой плотностью дефектов эпитаксиальных гетероструктур.

Рис. 11

Карта распределения поверхностной концентрации носителей и подвижности на пластине фирмы Novagan (Швейцария)

Особенности высоковольтных НЕМТ, вызванные введением второго барьерного слоя $Al_yGa_{1-y}N$

Отличие в связывании электронов только для GaN буферного слоя и при наличии второго $Al_yGa_{1-y}N$ буферного слоя определяется сдвигом порогового напряжения с увеличением напряжения на стоке. Пороговое напряжение сдвигается в более отрицательную сторону, когда напряжение на стоке увеличивается. Этот сдвиг более выражен для структуры только с одним GaN буферным слоем, чем для структуры со вторым $Al_yGa_{1-y}N$ буферным слоем. Для структуры только с одним GaN буферным слоем электроны могут дрейфовать глубже

в буферный слой в обход обеднённой области под затвором при достаточно высоком напряжении на стоке. Область обеднения под затвором должна дальше распространяться, чтобы закрыть канал. С другой стороны, движение электронов в буферный слой сдерживается вторым барьером $Al_yGa_{1-y}N$ (см. рис. 2). Следовательно, пороговое напряжение менее чувствительно к напряжению на стоке при наличии второго барьерного слоя.

Увеличение молярных долей Al в верхнем барьерном слое при постоянной молярной доли Al в нижнем барьерном слое приводит к увеличению $I_{DS \max}$ и сдвигу порогового напряжения в сторону увеличения.

Это связано с увеличением поляризационного заряда на верхней границе раздела, увеличением поверхностной плотности носителей ДЕГ. Но увеличение молевых долей Al в верхнем барьерном слое приводит к увеличению токов утечки из обратносмещённого перехода Шоттки. Можно предположить, что затвор усугубляет утечки с увеличением молевых долей Al в верхнем барьерном слое из-за возникновения напряжений в самом слое $Al_xGa_{1-x}N$, а также и между $Al_xGa_{1-x}N$ и материалом затвора Шоттки.

В случае структуры со вторым барьерным слоем высокий потенциальный барьер на границе раздела $GaN/Al_yGa_{1-y}N$, вызванный разницей в ширине запрещённых зон, создаёт отрицательный заряд, предотвращающий прокол (проникновение электронов в буферный слой $Al_yGa_{1-y}N$). При небольших расстояниях между затвором и стоком влияние напряжения на стоке очень сильное на потенциальный барьер. Как только напряжение на стоке увеличится до определённой величины, граничный потенциальный барьер понижается настолько, что позволяет электронам протекать в буферный слой, вызывая прокол. Для больших расстояний между затвором и стоком влияние напряжения на стоке на высоту потенциального барьера значительно меньше. В этом случае большее влияние оказывает затворный потенциал. С увеличением молевых долей Al в буферном слое $Al_yGa_{1-y}N$ высота потенциального барьера увеличивается и создаются более эффективные условия для блокирования токов утечки стока.

Необходимо обратить внимание на оптимальное соотношение между молевыми долями Al в буферном слое $Al_yGa_{1-y}N$ и толщиной канального слоя GaN . Для разра-

ботчиков приборов желательно поддерживать в толстом в буферном слое $Al_yGa_{1-y}N$ концентрацию молевых долей Al как можно меньше. Транзисторы с низкой концентрацией Al в буферном слое $Al_yGa_{1-y}N$ имеют более высокую плотность тока и низкое сопротивление открытого транзистора. Увеличение толщины канального слоя при постоянной концентрации в буферном слое $Al_yGa_{1-y}N$ снизит высоту потенциального барьера, ограничит удержание электронов под затвором и увеличит туннельные токи обратносмещённого контакта Шоттки, а это приведёт к преждевременному пробое и невозможности увеличивать напряжение на стоке при увеличении расстояния между затвором и стоком. С другой стороны, тонкий канальный слой при низкой высоте потенциального барьера не способен удерживать электроны в канальном слое, увеличит сопротивление открытого транзистора и понизит плотность тока стока. Но при этом очень сильно снизит туннельные токи утечки обратносмещённого затвора Шоттки, что приведёт к увеличению напряжения на стоке и возможности увеличивать напряжение на стоке при увеличении расстояния между затвором и стоком. Аналогичная зависимость наблюдается при увеличении молевых долей Al в буферном слое $Al_yGa_{1-y}N$ при постоянной толщине канального слоя. При этом увеличение молевых долей Al приведёт к увеличению высоты барьера, к обеднению канала носителями, а значит, к снижению максимальной плотности тока стока и увеличению сопротивления открытого транзистора. Но низкое значение молевых долей Al в нижнем барьерном слое не позволит получить желаемое удержание электронов в канальном слое.

Выводы

Мы рассмотрели влияние спонтанной и пьезоэлектрической поляризации на формирование ДЕГ на границе раздела $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ в структуре со вторым нижним барьерным слоем $Al_yGa_{1-y}N$. При изменении концентрации молярных долей Al в верхнем барьерном слое от 15 до 40 заметно увеличение поверхностной концентрации носителей $n_s(x)$. При изменении концентрации молярных долей Al в нижнем барьерном слое от 0.05 до 0.12 заметно снижение поверхностной концентрации n_s носителей. Структуры верхнего барьерного слоя $Al_xGa_{1-x}N$ с содержанием молярных долей $Al\ x > 0.4$ не применяют в связи с высоким рассогласованием кристаллической решётки и тепловым рассогласованием в буферном слое GaN, приводящим к высокой плотности структурных дефектов в слое $Al_xGa_{1-x}N$ и дефектам на границе раздела, снижая поверхностную концентрацию носителей в канале и подвижность ДЕГ. Структуры верхнего барьерного слоя $Al_xGa_{1-x}N$ с содержанием молярных долей $Al\ x < 0.15$ также не используют из-за малого значения смещения зоны проводимости между каналным слоем GaN и верхним барьерным слоем $Al_xGa_{1-x}N$ ($\Delta E_C < 0.20\text{ eV}$), которое не способно обеспечить приемлемое значение поверхностной концентрации носителей.

Введение второго обратного барьерного слоя приводит к лучшему удержанию электронов в каналном слое GaN, но при этом происходит снижение максимальной плотности тока стока и сдвиг порогового напряжения в положительную сторону. Это обусловлено поляризационными зарядами в гетероструктурах, энергетические состояния зон сильно зависят от концентрации молярных долей Al в обратном ба-

рьерном слое и толщины каналного слоя GaN. Необходимо оптимизировать соотношения между этими двумя параметрами. С увеличением толщины каналного слоя увеличиваются токи утечки обратносмещённого контакта Шоттки, этот ток становится преобладающим, а значит, приведёт к снижению пробивного напряжения в статическом состоянии. С уменьшением толщины каналного слоя появляется возможность управлять пробивным напряжением расстоянием между затвором и стоком, при этом напряжение на стоке растёт, достигая насыщения при дальнейшем увеличении расстояния между затвором и стоком.

Литература

1. Lidow Alex, GaN TRANSISTORS FOR EFFICIENT POWER CONVERSION, Wiley, 2015, 247 p.
2. 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.
3. 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.
4. Gallium Nitride (GaN) Physics, Devices, and Technology, Edited by Farid Medjoub, 2016 by Taylor & Francis Group LLC, 472 pp.
5. Handbook for III-V High Electron Mobility Transistor Technologies. Edited by D. Nirmal, J. Ajayan, 2019 by Taylor & Francis Group, LLC, 443 pp.
6. Power GaN Devices Materials, Applications and Reliability, Matteo Meneghini, Gaudenzio Meneghesso, Enrico Zanoni, 2017, Springer International Publishing Switzerland, 380 pp.

7. Максимов, А.Н. Влияние второго барьерного слоя AlGaN на параметры силовых HEMT / А.Н. Максимов, А.А. Краснов, А.И. Ивашко, А.П. Ледовских, М.М. Крымко, С.В. Корнеев, В.Ф. Синкевич // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – Вып. 1 (244). – С. 12-20.
8. Rudiger Quay, Gallium Nitride Electronics, 2008, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 471 pp.
- and efficient Schottky diodes based on GaN technology. 220th ECS Meeting, The Electrochemical Society, 2011.
4. Gallium Nitride (GaN) Physics, Devices, and Technology, Ed. by Farid Medjoub, Taylor & Francis Group LLC, 2016, 472 pp.
5. Handbook for III-V High Electron Mobility Transistor Technologies. Ed. by Nirmal D., Ajayan J., Taylor & Francis Group, LLC, 2019, 443 pp.
6. Meneghini M., Meneghesso G., Zanoni E. Power GaN Devices Materials, Applications and Reliability. Springer International Publishing Switzerland, 2017, 380 pp.
7. Maksimov A.N., Krasnov A.A., Ivashko A.I., Ledobskikh A.P., Krymko M.M., Korneev S.V., Sinkevich V.F. Vliyaniye vtorogo bar'yernogo sloya AlGaN na parametry silovykh HEMT [The effect of the second AlGaN barrier layer on the power HEMT performance]. Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Technology, 2017, iss. 1 (244), pp. 12-20.
8. Quay R., Gallium Nitride Electronics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 471 pp.

Rereferences

1. Lidow A. GaN transistors for efficient power conversion. Wiley, 2015, 247 p.
2. Germain M., Derluyn J., Van Hove M., Medjoub F., Das J., Marcon D., Degroote S., Cheng K., Leys M., Visalli D., Srivastava P., Geens K., Viaene J., Sijmus B., Decoutere S., Borghs G. GaN-on-Si for Power Conversion. CS MANTECH Conference, Portland, Oregon, USA, 2010.
3. Würfl J., Bahat-Treidel E., Brunner F., Cho M., Hilt O., Knauer A., Kotara P., Weyers M., Zhytnyska R. High voltage normally-off transistors