

Полевые p -канальные транзисторы на основе GaN/AlN/GaN-гетероструктуры на кремниевой подложке

© М.Н. Журавлев, В.И. Егоркин

Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
24498 Москва, Зеленоград, Россия

E-mail: maxim@org.miet.ru

Поступила в Редакцию 23 августа 2023 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2023 г.

Принята к публикации 11 декабря 2023 г.

Рассмотрены различные конструкции полевых p -канальных транзисторов на основе GaN/AlN/GaN-гетероструктуры. Канал создается поляризационно-индуцированным двумерным дырочным газом. Показано, что наибольшие значения тока насыщения и крутизны наблюдаются в транзисторе с затвором, формируемым двумерным электронным газом со стороны подложки.

Ключевые слова: AlN/GaN-гетероструктура, двумерный дырочный газ, p -канальный транзистор, поляризация.

DOI: 10.61011/FTP.2023.09.56993.5503

1. Введение

Нитрид-галлиевая технология обладает большим потенциалом в силовой электронике [1]. В настоящее время на основе Al(Ga)N/GaN-гетероструктур созданы дискретные n -канальные транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) с напряжениями пробоя до 1 кВ, которые могут заменять кремниевую элементную базу в схемах преобразования электроэнергии, повышая эффективность и увеличивая плотность мощности [2].

В то же время монолитная интеграция мощного транзистора и модулей управления, в первую очередь драйвера затвора, осложняется отсутствием p -канальных транзисторов для построения энергоэффективных комплементарных логических схем. Предпринимаются попытки обойти это ограничение с помощью альтернативных логических схем, таких как логика с прямой связью (DCFL) на основе n -канальных HEMT [3]. Однако она имеет ограничения, связанные с низкими выходными токами сложными процессами изготовления и высокой температурной чувствительностью.

Разработка p -канального транзистора на основе GaN велась менее интенсивно, чем n -канального, так как подвижность дырок в слое двумерного газа при комнатной температуре ограничена акустическим рассеянием фононов и не превосходит $\sim 25 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [4]. Низкая дрейфовая скорость дырок не позволяет создавать конкурирующие с кремнием маломощные быстродействующие логические схемы. Однако такая скорость позволяет обеспечить монолитную интеграцию схем управления и силовых ключей на едином кристалле, так как типичные рабочие частоты схем преобразования мощности находятся в диапазоне от 100 кГц до 10 МГц. Кроме логических схем, p -канальные транзисторы могут использоваться в качестве активной нагрузки в аналоговых схемах.

В настоящей работе обсуждаются различные конструкции p -канальных полевых транзисторов на основе GaN/AlN/GaN-гетероструктуры на кремниевой подложке. Изначально AlN/GaN-структуры использовались для изготовления n -канальных транзисторов с большими токами и крутизной. При наращивании дополнительного слоя GaN на поверхности AlN образуется двумерный дырочный газ, и тем самым обеспечивается технологическая основа для изготовления p -канальных транзисторов и монолитных комплементарных логических схем.

2. Выбор параметров модели

Кристаллы нитридов металлов III группы обладают гексагональной структурой типа вюрцита и обычно выращиваются вдоль направления [0001]. Ось c гексагональной решетки — полярная. В качестве положительного направления принято выбирать направление от катиона к аниону. Вдоль оси c направлен вектор спонтанной поляризации \mathbf{P}_{SP} . В работах [5,6] отмечается большой разброс рассчитанных значений спонтанной поляризации и рекомендуются значения -0.034 Кл/м^2 для GaN и -0.09 Кл/м^2 для AlN.

Постоянные решетки нитридов металлов III группы отличаются друг от друга. Поэтому, кроме спонтанной поляризации, необходимо также учитывать пьезоэлектрическую поляризацию \mathbf{P}_{PE} , связанную с деформацией материала:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_{\text{SP}} + \mathbf{P}_{\text{PE}}.$$

Соотношение, связывающее поляризацию вдоль оси c и тензор упругих модулей материала, в обозначениях

Параметры кристаллической решетки GaN и AlN

Параметр	a , Å	P_{SP} , Кл/м ²	e_{31}	e_{33}	C_{13}	C_{33}
GaN	3.189	-0.034	-0.17	0.29	92.0	389.9
AlN	3.112	-0.090	-0.60	1.34	101	387.6

Фойгта имеет вид [7]:

$$P_{PE} = 2 \frac{a - a_0}{a_0} \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right),$$

где C_{13} и C_{33} — компоненты тензора упругих модулей материала, e_{33} и e_{11} — пьезоэлектрические коэффициенты. Соотношение между ними таково, что вклад в поляризацию, связанный с пьезоэффектом, положителен (по отношению к принятому направлению оси c) при сжимающих напряжениях ($a < a_0$) и отрицателен при растягивающих ($a > a_0$). Следовательно, при растягивающих напряжениях направление поляризации, связанной с пьезоэффектом, совпадает с направлением спонтанной поляризации, а при сжимающих напряжениях — противоположно спонтанной поляризации. Тонкий слой Al(Ga)N на толстом слое GaN испытывает растягивающие напряжения.

В литературе обсуждаются разные значения для упругих и пьезоэлектрических параметров GaN и AlN (см., например, [6,8,9]). Значения, использовавшиеся в данной работе [10,11], приведены в таблице.

При проектировании конструкции транзистора необходимо учитывать высокую концентрацию фоновых примесей в GaN, выращенном по технологии MOCVD и MBE. Основные примеси: мелкие доноры — фоновый кремний и кислород, глубокий акцептор — углерод. В литературе [12–14] указывается, что обычно концентрация каждого примесного элемента изменяется в диапазоне $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$. С помощью компенсации может быть достигнута низкая суммарная концентрация электронов на уровне $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [15]. В процессе роста желательно получить как можно меньшую концентрацию фоновых примесей. В работе [16] показано, что примеси кремния и кислорода могут диффундировать из подложки и концентрироваться на гетеропереходе GaN/AlN. Являясь донорами, они частично компенсируют дырки, создают большое число центров рекомбинации и уменьшают подвижность носителей заряда в канале, что приводит к увеличению токов утечки и сопротивления транзистора в открытом состоянии (R_{on}).

Наиболее распространенный метод компенсации кислорода и кремния — легирование углеродом [17]. Однако в этом случае из-за инерционности технологических процессов, наличия в ростовой камере остаточных прекурсоров и диффузии возможно непреднамеренное легирование канального слоя углеродом. Типичное загрязнение углеродом, о котором сообщается при использовании ростовой технологии MOCVD, составляет

$\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для роста при 78 Торр и $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для роста при атмосферном давлении [18].

Моделирование проводилось с помощью САПР Sentaurus TCAD (Synopsys Inc.). Перенос заряда рассчитывался с помощью дрейфово-диффузионной модели. Глубокие примеси учитывались с помощью единственного уровня, описываемого в рамках модели Шокли–Рида–Холла.

3. *p*-канальный GaN/AlN транзистор с барьером Шоттки

На рис. 1 приведена простейшая конструкция *p*-канального транзистора, изготовленного по технологии GaN-на-Si. Транзисторная структура включает в себя тонкий напряженный барьерный слой AlN, выращенный на поверхности релаксированного GaN и зарощенный сверху нелегированным покровным слоем GaN. Затвор представляет собой барьер Шоттки и изготавливается с помощью нанесения металла на покровный слой GaN. Результирующая разность поляризаций на гетерогранице GaN/AlN ($P_{SP}(\text{AlN}) + P_{PE}(\text{AlN}) - P_{SP}(\text{GaN})$) создает отрицательный поверхностный заряд. Этот заряд создаёт электрическое поле, которое ионизирует электронные состояния в валентной зоне и на гетерогранице и тем самым обогащает пограничную область дырками. Дырки находятся в треугольной квантовой яме, образованной в результате изгиба края валентной зоны. Существование дырочного газа высокой плотности (2DHG) в нелегированных структурах GaN/AlN было экспериментально подтверждено в работе [4].

Зависимость концентрации двумерного дырочного газа p_s от толщин напряженного барьерного слоя AlN (d_{AlN}) и верхнего покровного слоя GaN (d_{GaN}) показана на рис. 2. Из графика видно, что при толщинах слоя GaN $> 25 \text{ нм}$ концентрация дырок зависит от нее слабо. С другой стороны, при увеличении толщины AlN слоевая концентрация дырок возрастает от 0 до $2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Такие значения концентрации соответствуют сопротивлению $\sim 7 \text{ кОм/кв.крат}$. При толщине слоя AlN $< 3 \text{ нм}$ слоевая концентрация

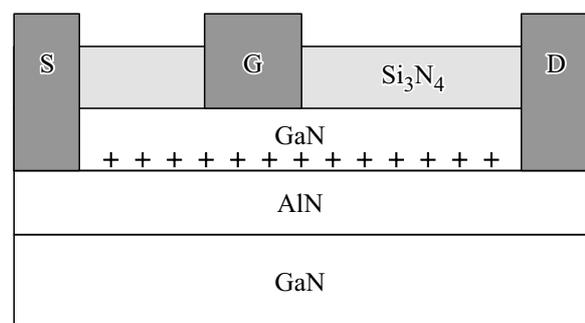


Рис. 1. Конструкция *p*-канального транзистора с затвором Шоттки на основе GaN/AlN/GaN-гетероструктуры.

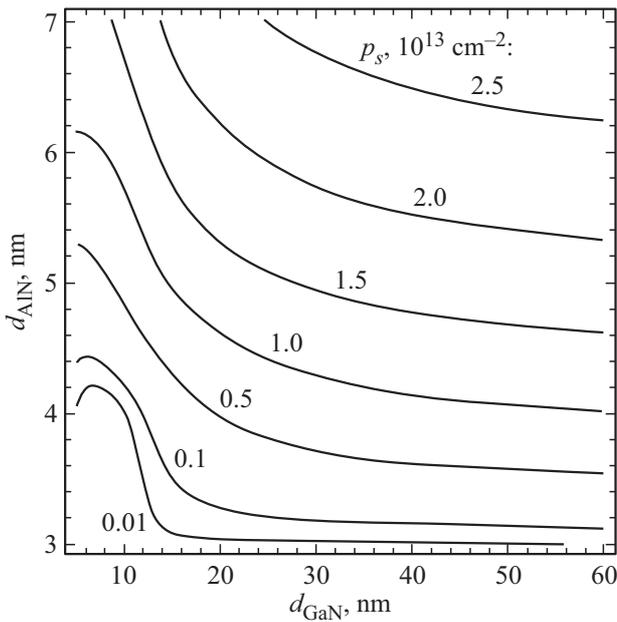


Рис. 2. Зависимость слоевой концентрации p_s двумерного дырочного газа от толщин напряженного барьерного слоя AlN (d_{AlN}) и сильно легированного слоя GaN (d_{GaN}).

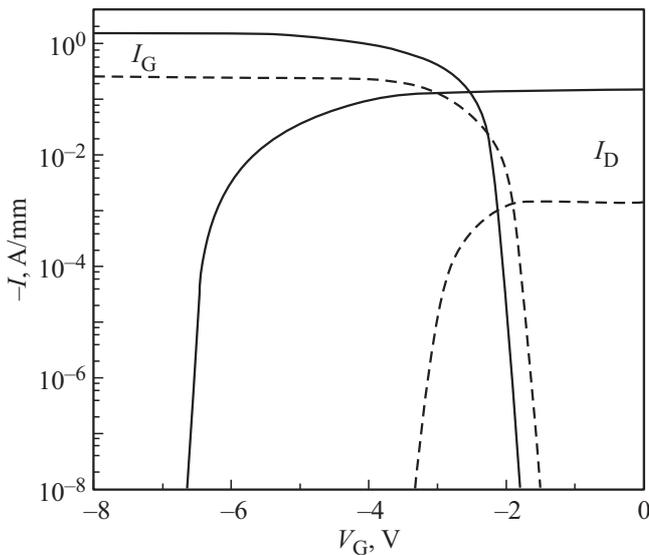


Рис. 3. Зависимости тока стока (I_D) и тока в затвор (I_G) от величины напряжения затвор-исток для транзисторов с толщиной слоя AlN 5 нм (сплошная линия) и 3 нм (пунктирная линия).

дырок становится $< 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а слоевое сопротивление $> 100 \text{ кОм/кв.см}$. Также при малых толщинах AlN-барьера ($< 3 \text{ нм}$) возможно понижение слоевой концентрации дырок и рост удельного сопротивления из-за шероховатости и дефектности гетерограницы [19].

Из графика видно, что для изготовления *p*-канального транзистора толщина слоя GaN должна быть $> 30\text{--}40 \text{ нм}$. С другой стороны, существует критическая

толщина барьерного слоя AlN d_c , меньше которой он остается напряженным. Используя приближенную оценку [20] $d_c \propto b/2\delta$, где $b = 0.3189 \text{ нм}$ — длина вектора Бюргера в напряженном AlN, а $\delta = 0.024$ — относительная деформация AlN, получаем критическую толщину $d_c \approx 6.5 \text{ нм}$. Если толщина d_{AlN} больше d_c , происходит релаксация напряженного при растяжении AlN и высвобождение энергии деформации в виде трещин вдоль гексагональных плоскостей. Это наблюдалось экспериментально в структурах AlN/GaN HEMT [21,22]. Структуры с толщиной слоя AlN $d_{\text{AlN}} > 7 \text{ нм}$ показали гексагональные трещины на поверхности при сканировании с помощью атомно-силовой микроскопии. Эти трещины приводят к подавлению подвижности дырок и поэтому нежелательны. Также в результате релаксации уменьшаются пьезоэлектрическая поляризация $P_{\text{PE}}(\text{AlN})$ и, как следствие, слоевая концентрация дырок.

На рис. 3 приведены зависимости тока стока (I_D) и тока в затвор (I_G) от величины напряжения затвор-исток для транзисторов с толщиной слоя AlN 5 нм (сплошная линия) и 3 нм (пунктирная линия). Напряжение сток-исток считалось равным -15 В . Фоновые примеси кремния и кислорода полностью скомпенсированы углеродом. Из графика видно, что пороговое напряжение увеличивается с ростом толщины AlN, так как возрастает слоевая концентрация двумерного дырочного газа. При толщинах $< 2.5 \text{ нм}$ транзистор можно считать закрытым. Важной особенностью рассматриваемой конструкции транзистора является возникновение больших токов утечки в затвор, когда напряжение на затворе больше высоты барьера Шоттки. Из графика видно, что высота барьера Шоттки меньше порогового напряжения. Типичные значения работы выхода металлов находятся в диапазоне $4\text{--}5 \text{ эВ}$. Поэтому заменой металла высоты барьера сильно изменить нельзя, и, как следствие, нельзя избавиться от токов утечки в затвор.

4. Транзистор с изолированным затвором

Схематическая конструкция транзистора показана на вставке к рис. 4. Металл затвора отделен от полупроводника слоем диэлектрика. Из-за высокой концентрации дырок в квантовой яме на гетероинтерфейсе для управления транзистором требуются большие пороговые напряжения. В качестве подзатворного диэлектрика необходимо использовать материалы с большим электрическим полем пробоя, например, Al_2O_3 . В МОП структуре пороговое напряжение (V_{th}) пропорционально отношению заряда исток-затвор к соответствующей емкости, $Q_{\text{SG}}/C_{\text{SG}}$. Зарядом Q_{SG} можно управлять, изменяя толщину (d_{GaN}) и уровень легирования покровного слоя GaN. При фиксированной толщине подзатворного диэлектрика емкость C_{SG} может быть аппроксимирована формулой плоского конденсатора и, таким образом, $C_{\text{SG}} \propto d_{\text{GaN}}^{-1}$. Чтобы уменьшить пороговое напряжение

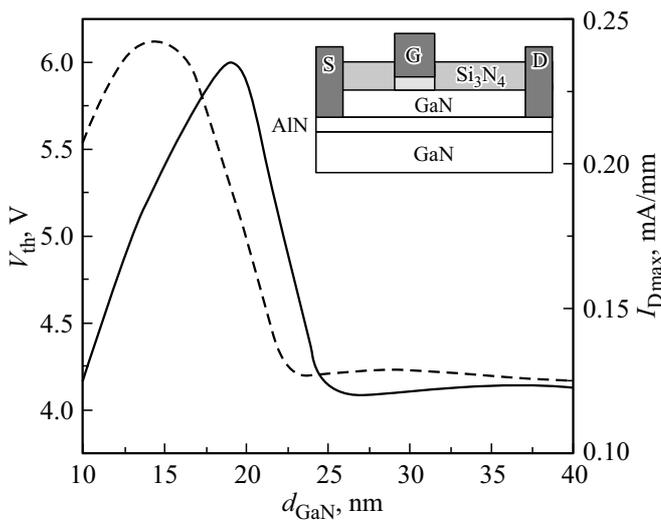


Рис. 4. Зависимость порогового напряжения V_{th} (сплошная линия) и максимального тока стока I_{Dmax} (пунктирная линия) от толщины слоя n^+ -GaN.

и получить управляемый МОП-транзистор, заряд Q_{SG} может быть уменьшен за счет легирования покровного слоя GaN донорной примесью, например кремнием, и компенсации дырок в канале. Однако это увеличивает сопротивление транзистора в открытом состоянии (или уменьшает ток стока) из-за рассеяния носителей.

На рис. 4 показана зависимость порогового напряжения и максимального тока стока от толщины покровного слоя GaN, легированного кремнием до концентрации 10^{19} см^{-3} . Толщина барьерного слоя AlN — 4 нм. Расчеты показали, что если толщина слоя GaN < 40 нм, то подбарьерная область полностью обеднена электронами, и проводимость определяется только свойствами двумерного дырочного газа. Из графика видно, что для изготовления p -канального транзистора с большими токами стока оптимальная толщина n^+ -GaN — 12–17 нм, примерно соответствующая области двумерного дырочного газа. При увеличении толщины барьерного слоя AlN до 7 нм максимальный ток стока увеличится с 0.2 до 7–8 мА/мм. Однако в этом случае пороговое напряжение будет > 10 В и возможен пробой подзатворного диэлектрика.

Выращивание высоколегированного слоя GaN позволяет совместить изготовление p -канального транзистора с изготовлением неплавных омических контактов к n -канальному транзистору и в перспективе изготовить монолитную комплементарную пару транзисторов в едином технологическом процессе. В n -канальных транзисторах на основе AlN/GaN-гетероструктур наблюдаются токи ~ 1 А/мм [23,24]. В p -канальных транзисторах с изолированным затвором на аналогичной структуре будут достигаться токи $\sim 10^{-5}$ – 10^{-3} А/мм в зависимости от толщины слоя AlN. Изменяя только отношение ширины затворов, разницу уровней токов транзисторов выровнять нельзя. Для уменьшения рассогласования по

току можно провести легирование канального слоя GaN углеродом и тем самым повысить его сопротивление. В этом случае уровень Ферми сдвигается к краю валентной зоны, концентрация электронов в слое двумерного электронного газа уменьшается, а дырок в слое двумерного дырочного газа — увеличивается.

5. Транзистор с обратным затвором

Чтобы использовать преимущества согласованной по току комплементарной логики, необходимо изготовить p -канальный транзистор с уровнем тока ~ 0.1 – 1 А/мм. Рассмотрим конструкцию транзистора с затвором, формируемым двумерным электронным газом со стороны подложки. Схема транзисторной структуры показана на вставке к рис. 5. Для изготовления электродов затвора проводится сквозное травление верхнего слоя GaN и барьерного слоя AlN с заглублением в лежащий под ним слой GaN. Далее формируются низкоомные омические контакты к области двумерного электронного газа с помощью последовательного напыления слоев титана, алюминия, никеля и золота и термического отжига. В этом случае тонкий барьерный слой AlN выполняет функцию подзатворного диэлектрика. Современные эпитаксиальные технологии позволяют выращивать напряженные слои AlN с низкой плотностью пронизывающих дислокаций и тем самым обеспечить низкие токи утечки в затворе.

Отсутствие управляющего электрода между стоком и истоком позволяет эффективно использовать масштабирование расстояния сток-исток (L_{SD}) для повышения максимального тока стока I_{Dmax} . Уменьшение L_{SD} увеличивает напряженность электрического поля и уменьшает

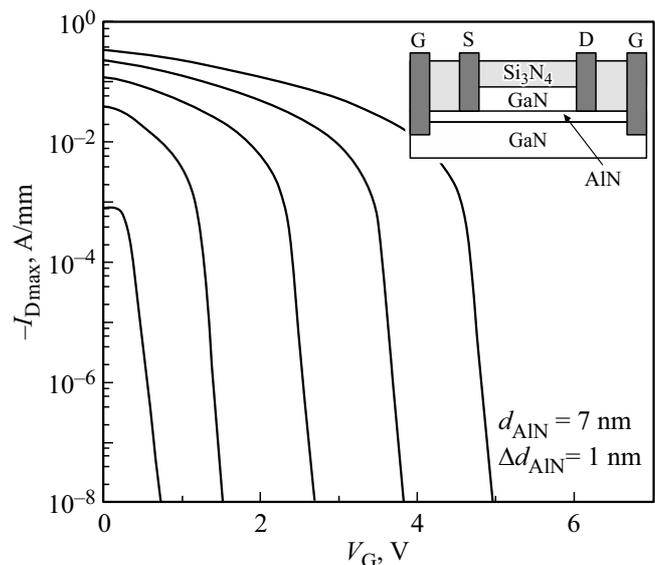


Рис. 5. Зависимости максимальной плотности тока стока при насыщении от напряжения на затворе при различных толщинах барьерного слоя AlN в диапазоне $d_{AlN} = 3$ – 7 нм.

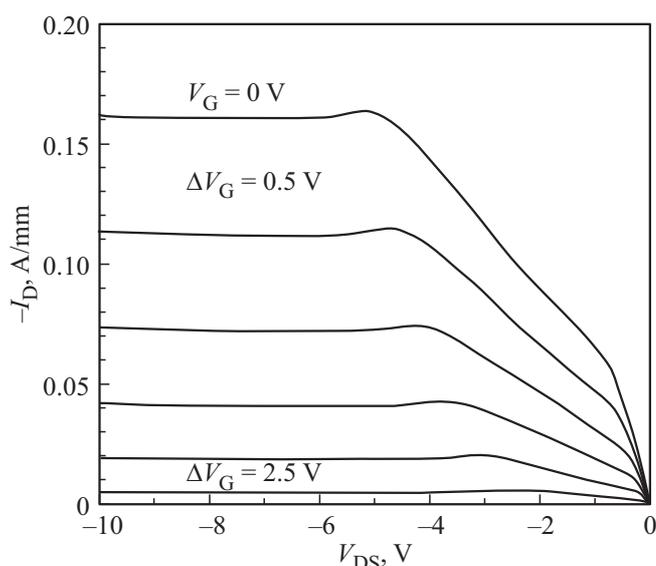


Рис. 6. Выходные характеристики транзистора с затвором в слое двумерного электронного газа.

падение напряжения. Уменьшение L_{SD} также должно увеличить скорость работы полевых транзисторов. Однако масштабирование L_{SD} должно учитывать требования к транзистору по напряжению пробоя.

На рис. 5 показан набор зависимостей максимальной плотности тока стока при насыщении от напряжения на затворе при различных толщинах барьерного слоя AlN. $L_{SD} = 4.25$ нм. В этом случае значения $I_{Dmax} > 0.1$ А/мм наблюдаются при толщине AlN > 5 нм. Рассматриваемая конструкция транзистора позволяет повысить максимальную плотность тока по сравнению с конструкцией с изолированным затвором. Типичные выходные характеристики для транзистора с толщиной барьерного слоя 5.5 нм приведены на рис. 6. Максимальное значение крутизны ~ 100 мСм/мм. При масштабировании L_{SD} ток стока и крутизна могут быть увеличены в 1.5–2 раза, в зависимости от доступной технологии изготовления. Для заданного порогового напряжения можно подобрать толщину AlN, обеспечив приемлемое значение сопротивления в открытом состоянии R_{on} и минимальное изменение характеристик транзистора при технологическом разбросе параметров барьерного слоя.

6. Заключение

В настоящее время наиболее близкая к коммерческой реализации структура для изготовления *p*-канального транзистора — *p*-GaN/AlGaIn/GaN. К недостатку данной структуры следует отнести относительно высокую энергию ионизации атомов акцепторной примеси Mg (150–200 мэВ). Из-за неполной ионизации примеси максимальное достижимое значение объемной концентрации дырок не превосходит 10^{18} см $^{-3}$ [25]. Обычно применяется легирование Mg до концентрации $2 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$.

При больших концентрациях примеси происходит аморфизация материала, концентрация дырок изменяется слабо [26] и сильно падает подвижность [27]. Из-за низких плотности и подвижности носителей заряда в канале токи стока транзисторов не превосходят 100 мА/мм.

Рассматриваемая в настоящей работе конструкция с обратным затвором на основе GaN/AlN/GaN-гетероструктуры свободна от указанного недостатка. Для создания дырочного газа применяется поляризационный заряд. Поляризационный заряд не зависит от уровня Ферми, и поэтому он не экранирует электрическое поле затвора. Также следует отметить, что благодаря высоким пьезоэлектрическим свойствам AlN на рассмотренной структуре можно проводить интеграцию в единой монокристаллической схеме пассивных радиочастотных компонентов, таких как фильтры, волноводы и антенны.

Второй проблемой для этих структур являются омические контакты к области двумерного дырочного газа. Из-за широкой запрещенной зоны нитрида галлия (3.4 эВ) и типичных значений работы выхода металла в диапазоне 4–5 эВ на границе металл-полупроводник всегда возникает барьер Шоттки высотой 1.6–2.5 эВ [28]. Задача создания омических контактов с сопротивлением порядка нескольких Ом · мм может быть решена с помощью эпитаксиального наращивания сильно легированных слоев *p*-InGaIn [29] или оксида индия олова (ITO) [30].

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Amano, Y. Baines, E. Beam, M. Borga, T. Bouchet, P.R. Chalker, M. Charles, K.J. Chen, N. Chowdhury, R. Chu. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51**, 163001 (2018).
- [2] A. Lidow, M. de Rooij, J. Strydom, D. Reusch, J. Glaser. *GaN Transistors for Efficient Power Conversion* (John Wiley & Sons Ltd., 2019).
- [3] M.L. Schuette, A. Ketterson, B. Song, E. Beam, T.-M. Chou, M. Pilla, H.-Q. Tserng, X. Gao, S. Guo, P.J. Fay, H.G. Xing, P. Saunier. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **34** (6), 741 (2013).
- [4] R. Chaudhuri, S.J. Bader, Z. Chen, D.A. Muller, H.G. Xing, D. Jena. *Science*, **365**, 1454 (2019).
- [5] F. Bernardini, V. Fiorentini, D. Vanderbilt. *Phys. Rev. B*, **63** (19), 1 (2001).
- [6] I. Vurgaftman, J.R. Meyer. *J. Appl. Phys.*, **94** (6), 3675 (2003).
- [7] O. Ambacher, B. Foutz, J. Smart, J.R. Shealy, N.G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, A.J. Sierakowski, W.J. Schaff, L.F. Eastman. *J. Appl. Phys.*, **87** (1), 334 (2000).
- [8] M. Kazan, E. Moussaed, R. Nader, P. Masri. *Phys. Status Solidi*, **4** (1), 204 (2007).
- [9] K. Adachi, H. Ogi, A. Nagakubo, N. Nakamura, M. Hirao, M. Imade, M. Yoshimura, Y. Mori. *J. Appl. Phys.*, **119** (24), 245111 (2016).
- [10] N. Nakamura, H. Ogi, M. Hirao. *J. Appl. Phys.*, **111** (1), 013509 (2012).

- [11] A.V. Sotnikov, H. Schmidt, M. Weihnacht, E.P. Smirnova, T.Y. Chemekova, Y.N. Makarov. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.*, **57** (4), 808 (2010).
- [12] M.A. Reshchikov, M. Vorobiov, O. Andrieiev, K. Ding, N.Izyumskaya, V. Avrutin, A. Usikov, H. Helava, Y. Makarov. *Sci. Rep.*, **10**, 2223 (2020).
- [13] D.D. Koleske, A.E. Wickenden, R.L. Henry, M.E. Twigg. *J. Cryst. Growth*, **242** (1–2), 55 (2002).
- [14] Y. Zhang, Z. Chen, W. Li, H. Lee, M.R. Karim, A.R. Archart, S.A. Ringel, S. Rajan, H. Zhao. *J. Appl. Phys.*, **127** (21), 215707 (2020).
- [15] Z. Chen, Y. Zhang, H. Zhao. *Opt. Express*, **28** (18), 26651 (2020).
- [16] R. Chaudhuri, Z. Chen, D.A. Muller, H.G. Xing, D. Jena. *J. Appl. Phys.*, **130** (2), 025703 (2021).
- [17] N. Remesh, N. Mohan, S. Raghavan, R. Muralidharan, D.N. Nath. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **67** (6), 2311 (2020).
- [18] A.Y. Polyakov, I.H. Lee. *Mater. Sci. Eng. Reports*, **94**, 1 (2015).
- [19] К.С. Журавлев, Т.В. Малин, В.Г. Мансуров, О.Е. Терещенко, К.К. Абгарян, Д.Л. Ревизников, В.Е. Земляков, В.И. Егоркин, Я.М. Парнес, В.Г. Тихомиров, И.П. Просвириин. *ФТП*, **51** (3), 395 (2017).
- [20] R. Beanland, D.J. Dunstan, P.J. Goodhew. *Adv. Phys.*, **45** (2), 87 (1996).
- [21] I.P. Smorchkova, L. Chen, T. Mates, L. Shen, S. Heikman, B. Moran, S. Keller, S.P. DenBaars, J.S. Speck, U.K. Mishra. *J. Appl. Phys.*, **90** (10), 5196 (2001).
- [22] Yu Cao, D. Jena. *Appl. Phys. Lett.*, **90** (18), 182112 (2007).
- [23] F. Medjdoub, M. Zegaoui, D. Ducatteau, N. Rolland, P.A. Rolland. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **32** (7), 874 (2011).
- [24] T. Zimmermann, D. Deen, Y. Cao, J. Simon, P. Fay, D. Jena, H.G. Xing. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **29** (7), 661 (2008).
- [25] U. Kaufmann, P. Schlotter, H. Obloh, K. Köhler, M. Maier. *Phys. Rev. B*, **62** (16), 10867 (2000).
- [26] T. Narita, H. Yoshida, K. Tomita, K. Kataoka, H. Sakurai, M. Horita, M. Bockowski, N. Ikarashi, J. Suda, T. Kachi, Y. Tokuda. *J. Appl. Phys.*, **128** (9), 090901 (2020).
- [27] I.P. Smorchkova, E. Haus, B. Heying, P. Kozodoy, P. Fini, J.P. Ibbetson, S. Keller, S.P. DenBaars, J.S. Speck, U.K. Mishra. *Appl. Phys. Lett.*, **76** (6), 718 (2000).
- [28] G. Greco, F. Iucolano, F. Roccaforte. *Appl. Surf. Sci.*, **383**, 324 (2016).
- [29] K. Kumakura, T. Makimoto, N. Kobayashi. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (4), 2254 (2003).
- [30] R.H. Horng, D.S. Wu, Y.C. Lien, W.H. Lan. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (18), 2925 (2001).

Редактор А.Н. Смирнов

Field p -channel transistors based on GaN/AlN/GaN heterostructures on a silicon substrate

M.N. Zhuravlev, V.I. Egorkin

National Research University of Electronic Technology (MIET),
124498 Moscow, Zelenograd, Russia

Abstract Various types of p -channel field-effect transistors based on GaN/AlN/GaN heterostructures are considered. The channel is formed by a polarization-induced two-dimensional hole gas. It is shown that the highest values of saturation current and transconductance are observed in a transistor with a gate formed by a two-dimensional electron gas from the side of the substrate.