

07

## Нормально закрытые транзисторы на основе *in situ* пассивированных гетероструктур AlN/GaN

© К.С. Журавлев<sup>1,2</sup>, Т.В. Малин<sup>1</sup>, В.Г. Мансуров<sup>1</sup>, В.Е. Земляков<sup>3</sup>, В.И. Егоркин<sup>3</sup>, Я.М. Парнес<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Москва, Зеленоград

<sup>4</sup> ЗАО „Светлана-Электронприбор“, Санкт-Петербург  
E-mail: zhur@isp.nsc.ru; vzml@rambler.ru

Поступило в Редакцию 29 февраля 2016 г.

Развита технология молекулярно-лучевой эпитаксии роста *in situ* пассивированных гетероструктур SiN/AlN/GaN со сверхтонким барьером AlN. Продемонстрированы нормально закрытые транзисторы с максимальной плотностью тока около 1 A/mm, напряжением насыщения 1 V, крутизной до 350 mS/mm, пробивным напряжением более 60 V. Транзисторы показали практическое отсутствие эффектов стокового и затворного коллапса.

Нитрид-галлиевые гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) имеют замечательный потенциал для высокочастотной и силовой электроники в силу большой ширины запрещенной зоны и высокой пиковой и насыщенной скорости электронов в электрическом поле. По сравнению с начальным состоянием, когда первый нитрид-галлиевый транзистор со встроенным каналом высокоподвижных электронов (depletion mode НЕМТ) был продемонстрирован [1], ключевые параметры D-НЕМТ значительно улучшены. Достигнута наивысшая плотность выходной мощности среди всех твердотельных СВЧ-приборов, равная 30 W/mm на частоте около 10 GHz и 10.5 W/mm на частоте 40 GHz [2,3]. В настоящее время значительные усилия направлены на создание нитрид-галлиевых транзисторов с индуцированным каналом (enhanced mode

HEMT), 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.

Для получения E-HEMT опробовались различные подходы [4], включая рост ГЭС AlGaN/GaN с тонким (10 nm) барьером AlGaN [5], травление части барьера, расположенной под затвором [6,7], формирование  $p-n$ -перехода под затвором [8], обработку барьера во фторидной плазме [9], рост  $N$ -полярных ГЭС [10]. Эти подходы, однако, не обеспечивают необходимой однородности, воспроизводимости и стабильности приборов. Одним из наиболее перспективных направлений получения E-HEMT является использование ГЭС AlN/GaN со сверхтонким (менее 6 nm) барьером [11,12].

В данной работе продемонстрирована возможность получения E-HEMT на основе ГЭС AlN/GaN, пассивированных пленкой SiN сразу после выращивания гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

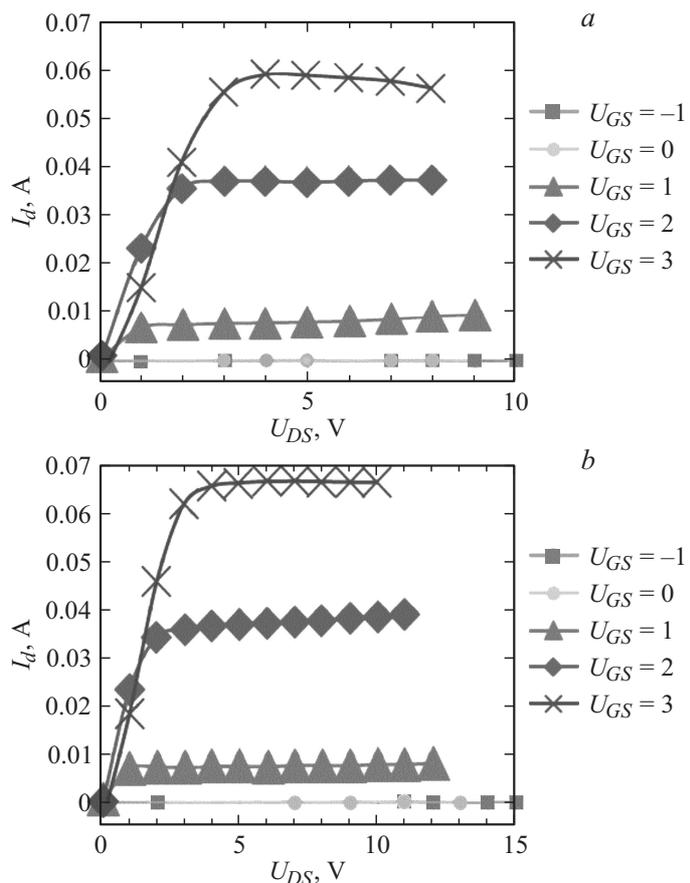
ГЭС AlN/GaN выращивались на подложках сапфира ориентации (0001) в установке МЛЭ типа CBE Riber-32N с твердотельными источниками сверхчистого галлия и алюминия и газообразным аммиаком в качестве источника активного азота. ГЭС состояли из барьерного слоя AlN толщиной около 4 nm, слоя GaN толщиной 1.5  $\mu\text{m}$  и буферного слоя AlN толщиной около 300 nm. Буферный слой AlN был выращен при 940°C в потоке аммиака 15 sccm. Рост слоя GaN осуществлялся в потоке аммиака около 150 sccm и при температуре около 800°C. Поскольку оптимальные условия роста слоев AlN и GaN сильно различаются, то были определены компромиссные условия роста верхней части ГЭС AlN/GaN. Для разработки технологии роста сверхтонких барьерных слоев AlN выращивались и анализировались короткопериодные сверхрешетки AlN/GaN. Атомное строение границ раздела и особенности морфологии ГЭС AlN/GaN изучались методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и спектроскопии тонкой структуры поглощения рентгеновских лучей (EXAFS-спектроскопия). EXAFS-спектроскопия позволила установить, что степень перемешивания гетерограниц AlN/GaN уменьшается при понижении температуры роста [13], поэтому верхняя часть ГЭС AlN/GaN выращивалась при температуре около 800°C. ПЭМ показала, что в выбранных условиях роста получают ГЭС AlN/GaN с резкими гетерограницами между

слоями [14]. Подвижность двумерных электронов в ГЭС SiN AlN/GaN при комнатной температуре составляла  $\mu = 1200 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  при концентрации электронов  $n_e = 1.1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .

Ультратонкое покрытие поверхности ГЭС нитридом кремния осуществлялось непосредственно в камере роста установки МЛЭ. В качестве прекурсоров использовались газы (силан и аммиак), которые разлагались на поверхности AlN при температуре около  $800^\circ\text{C}$  и формировали слой диэлектрика SiN толщиной около 1 nm. Для контроля формирования слоя SiN использовался метод дифракции быстрых электронов. Исходная поверхность AlN характеризовалась структурой  $(2 \times 2)$ , которая наблюдалась при пониженных температурах ( $400\text{--}500^\circ\text{C}$ ) в потоке аммиака 20–50 sccm. Нанесение SiN на поверхность AlN сначала приводило к формированию сверхструктуры поверхности  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$ , которая появлялась в области покрытий в 1–2 монослоя (толщина монослоя равна примерно 0.3 nm). При дальнейшем нанесении SiN регистрировалась сверхструктура  $(1 \times 1)$ , которая затем заменилась неупорядоченной аморфной фазой.

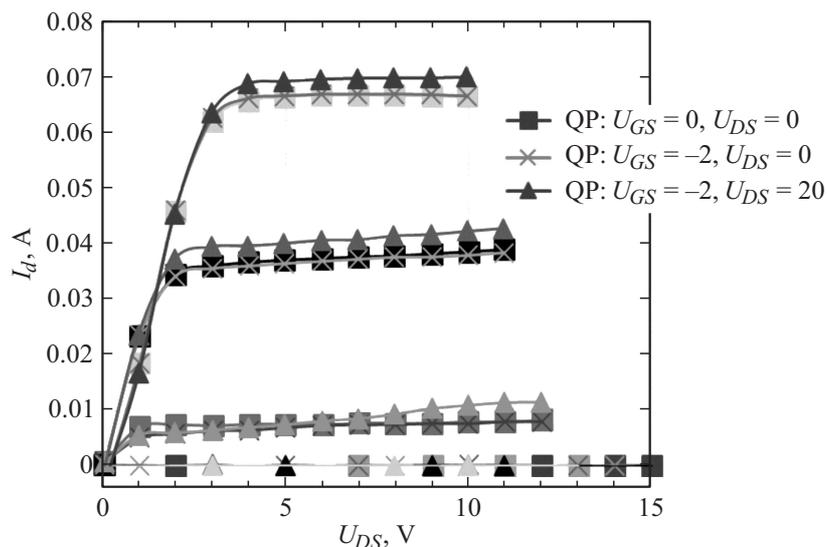
На основе выращенных ГЭС методом оптической литографии были сформированы полевые транзисторы с затвором Шоттки. Длина затвора ( $L_g$ ) составила  $0.6 \mu\text{m}$ , а ширина затвора варьировалась от 50 до  $400 \mu\text{m}$ . Металлизация затвора Ni/Au пассивировалась  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на установке плазменного осаждения. Омические контакты из слоев Ti/Al/Ni/Au вжигались в печи быстрого отжига при температуре  $850^\circ\text{C}$ . Межа транзистора формировалась травлением в плазме  $\text{CCl}_4$ . До создания затвора ток прибора равнялся 1 A/mm, в приборе с затвором ток падал до нуля и при приложении положительных смещений на затвор ( $U_{GS}$ ) до 3 V прибор открывался до уровня 0.5 A/mm. В отличие от известных методов создания транзисторов E-HEMT, не потребовалось использовать специальные плазменные обработки, травление канала или легирование компенсирующими акцепторными примесями. Закрытые транзисторы получились за счет конструкции гетероструктуры, обеспечившей необходимую близость канала транзистора к затвору.

В полученных транзисторах исследовались низкочастотные и СВЧ-характеристики. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзистора измерялись в статическом и импульсном режимах. Такие измерения позволяют оценивать величину токового коллапса [15]. Токовый коллапс, т.е. падение тока насыщения транзисторов при работе в



**Рис. 1.** ВАХ E-HEMT транзистора, измеренные в непрерывном (a) и импульсном (b) режимах с разверткой из нулевой точки. При напряжении на затворе  $U_{GS} = 3$  V и тянущем напряжении  $U_{DS} = 7.5$  V величина значения стокового тока  $I_d$  при работе в импульсном режиме на 14% больше по сравнению с непрерывным режимом.

СВЧ-диапазоне, является одним из основных препятствий для повышения их мощности. Этот эффект связывают с медленными состояниями на поверхности и в объеме ГЭС, которые не успевают перезаряжаться



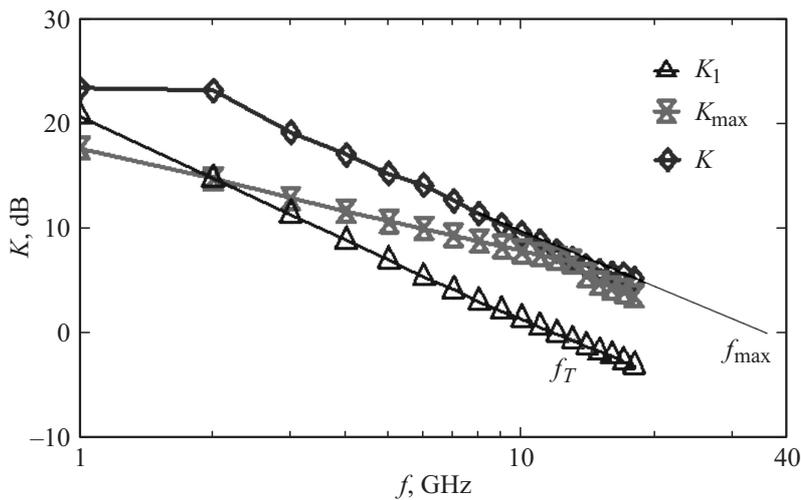
**Рис. 2.** Импульсные ВАХ Е-НЕМТ, полученные разверткой из разных точек покоя ( $QP$ ). Для  $U_{DS} = 10$  В и точек покоя ( $U_{GS} = 0$  В,  $U_{DS} = 0$  В;  $U_{GS} = -2$  В,  $U_{DS} = 20$  В) коллапс тока составил  $\sim 2\%$ . В точке покоя ( $U_{GS} = -2$  В,  $U_{DS} = 20$  В) происходит зарядка состояний под затвором и между затвором и стоком.

вслед за СВЧ-сигналом. Выходная СВЧ-мощность транзисторов ( $P_{out}$ ) с таким эффектом оказывается значительно меньше, чем рассчитанная по данным статической ВАХ по следующей формуле:

$$P_{out} = \frac{I_{DS\max}(U_{DSbreak} - U_{DSsatur})}{8}.$$

Здесь  $I_{DS\max}$  — максимальный ток сток-исток,  $U_{DSsatur}$ ,  $U_{DSbreak}$  — напряжение сток-исток, при котором  $I_{DS}$  насыщается и транзистор пробивается соответственно.

На рис. 1 приведены типичные ВАХ Е-НЕМТ с однополярным питанием, измеренные в непрерывном и импульсном режимах с разверткой из нуля. Удельная крутизна Е-НЕМТ достигает  $350 \mu\text{S}/\text{mm}$ , пробивное напряжение 60 В. Длительность импульса напряжения сток-исток ( $U_{DS}$ )



**Рис. 3.** Максимальный коэффициент усиления ( $K_{\max}$ ), однонаправленный коэффициент усиления ( $K$ ) и коэффициент усиления по току ( $K_I$ ) E-HEMT как функция рабочей частоты транзистора.

составила  $t_{DS} = 1 \mu s$ , а измерения проводились в течение  $t_{meas} = 0.2 \mu s$  на участке  $0.5-0.7 \mu s$ . Напряжение затвор-исток подавалось на  $1.5 \mu s$  раньше и снималось на  $1.5 \mu s$  позже относительно  $U_{DS}$ . Видно, что величина тока стока ( $I_d$ ) при работе в импульсном режиме больше по сравнению с током в непрерывном режиме из-за перегрева транзистора. Импульсные ВАХ, полученные с помощью специализированного оборудования, позволяющего выбирать начальную точку развертки ВАХ (точку покоя), приведены на рис. 2. Точка покоя устанавливалась в паузе между измерительными импульсами. Разница значений тока при фиксированном  $U_{DS}$ , полученных для ВАХ, снятых из различных точек покоя, в процентном отношении определяет значение коллапса тока. Коллапс тока E-HEMT составил  $\sim 2\%$ . Отметим, что в измеренном нами серийном транзисторе типа Triquint TGF2023 коллапс тока составил около 30%.

На рис. 3 показана зависимость максимального коэффициента усиления ( $K_{\max}$ ), однонаправленного коэффициента усиления ( $K$ ) и коэффициента усиления по току ( $K_I$ ) от рабочей частоты транзисторов.

Существенных изменений этой зависимости при смене местоположения транзистора на двухдюймовой ГЭС не наблюдалось, что говорит о ее однородности. Усредненная оценка величины граничной частоты усиления по току ( $f_T$ ), полученная путем линейной экстраполяции  $K_I$ ,  $f_T \sim 13 \text{ GHz}$  ( $L_g f_T \sim 15 \text{ GHz} \cdot \mu\text{m}$ ). Экстраполируя  $K$ , получили максимальную частоту усиления  $f_{\text{max}} \sim 32 \text{ GHz}$ . Увеличение значения  $f_T$  можно ожидать при уменьшении длины затвора [11].

Представлены результаты разработки технологии МЛЭ гетероструктур SiN/AlN GaN со сверхтонким барьером, пассивированных в камере роста. На выращенной ГЭС сформированы нормально закрытые транзисторы. E-HEMT получились за счет конструкции ГЭС, обеспечившей необходимую близость канала транзистора к затвору. Крутизна E-HEMT с шириной затвора  $200 \mu\text{m}$  составила  $350 \text{ mS/mm}$ , пробивное напряжение  $60 \text{ V}$ . Определена граничная частота усиления по току  $f_T \sim 13 \text{ GHz}$ . Показано практическое отсутствие токового коллапса транзистора, которое мы связываем с успешной пассивацией медленных поверхностных состояний слоем нитрида кремния.

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

## Список литературы

- [1] Khan M.A., Bhattarai A., Kuznia J.N., Olson D.T. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. P. 1214.
- [2] Wu Y.-F., Kapolnek D., Ibbetson J.P. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2004. V. 25 (3). P. 117–119.
- [3] Palacios T., Chakraborty A., Rajan S. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2005. V. 26 (11). P. 781–783.
- [4] Millan J., Godignon P., Perpina X. et al. // IEEE Trans Power Electron. 2014. V. 29 (5). P. 2155–2163.
- [5] Akira Endoh, Yoshimi Yamashita, Keiji Ikeda et al. // Jap. J. Appl. Phys. 2004. V. 43 (4b). P. 2255–2258.
- [6] Moon J., Shihchang W. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2005. V. 26 (6). P. 348.
- [7] Wang Chong, Zhang Jinfeng, Quan Si et al. // J. Semiconductors. 2008. V. 29 (9). P. 1682.
- [8] Hu X., Simin G., Yang J. et al. // Electron Lett. 2000. V. 36 (13). P. 753.

- 
- [9] *Cai Y., Zhou Y., Lau K.M.* et al. // *IEEE Trans Electron Devices*. 2006. V. 53 (9). P. 2207.
- [10] *Kuroda M.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 102. P. 093 703.
- [11] *David A. Deen, David F. Storm, David J. Meyer* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 105. P. 093 503.
- [12] *Nicolas Herbecq, Isabelle Roch-Jeune, Nathalie Rolland* et al. // *Appl. Phys. Express*. 2014. V. 7 (3). P. 034 103.
- [13] *Zhuravlev K., Malin T., Trubina S.* et al. // *Phys. Status Solidi C*. 2013. V. 10 (3). P. 311–314.
- [14] *Журавлев К.С., Малин Т.В., Мансуров В.Г., Земляков В.Е., Егоркин В.И., Парнес Я.М.* // 25-я Международная конференция „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“. Севастополь, Крым, Россия. Сентябрь 2015. С. 598–599.
- [15] *Jardel O., De Groot F., Charbonniaud C.* et al. // *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.* Honolulu. HI. Jun. 2007. P. 601–604.