

PACS numbers: 72.80.Ey, 73.40.-c, 73.50.Fq, 73.61.-r, 73.63.Rt, 81.40.Wx, 85.30.-z

## Влияние протонного облучения на AlGaN/GaN транзисторы с высокой подвижностью электронов

М. Батаев, Ю. Батаев\*, Л. Бриллсон\*

*Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины,  
просп. Науки, 41,  
03028 Киев, Украина  
\*Department of Physics,  
The Ohio State University,  
2018 Physics Research Building & 205 Dreese Laboratory,  
2015 Neil Ave.,  
Columbus, OH 43210, U.S.A.*

Деградація транзисторів під впливом протонного опромінення з енергією 1,8 МеВ вимірювалася до густини протонного опромінення  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Структури з високою рухливістю електронів на основі AlGaN/AlN/GaN мають вище значення електронної мобільності, ніж структури на основі AlGaN/GaN, і мають вищу радіаційну стійкість з відсутністю згасання електричних властивостей до значення інтегральної густини потоку протонів  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Вимірювані електрофізичні параметри транзисторних структур продемонстрували зменшення максимальної крутизни ВАХ, збільшення порогу струму та зменшення струму насичення. Основними механізмами деградації структур під впливом протонного опромінення є зменшення рухливості носіїв внаслідок збільшення розсіювання носіїв на границі та зменшення густини носіїв в каналі в результаті переміщення носіїв на глибокі рівні зони провідності.

Деградація транзисторів під впливом протонного опромінення з енергією у 1,8 МеВ досліджувалася до густини протонного опромінення у  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Структури з високою рухливістю електронів на основі AlGaN/AlN/GaN мають вище значення електронної мобільності, ніж структури на основі шарів AlGaN/GaN, та демонструють більш високу радіаційну стійкість з відсутністю деградації електрофізичних властивостей структури до значення інтегральної густини протонного опромінення у  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Виміряні електрофізичні параметри транзисторних структур продемонстрували зменшення максимальної крутизни ВАХ, збільшення порогу струму та зменшення струму насичення. Основними механізмами деградації структур під впливом протонного опромінення є зменшення рухливості носіїв вна-

слідок розсіяння носіїв на межі шарів та зменшення густини носіїв у каналі завдяки переміщенню носіїв на глибокі рівні з зони провідності.

High electron mobility transistor (HEMT) degradation under 1.8 MeV proton irradiation has been studied up to the proton fluence of  $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . High electron mobility AlGaN/AlN/GaN structures demonstrate higher electron mobility compared to AlGaN/GaN ones, and possess higher radiation hardness that show no degradation for transistors parameters to the level of proton irradiation density of  $10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . Measured HEMT transistors parameters suggest decrease in transconductance of  $I-V$  curves, increase in threshold current, and decrease in saturation current. The main reasons for HEMT parameters degradation under irradiation are decrease in carrier mobility due to scattering mechanisms at the layer interface and decrease in carrier concentration due to carrier removal to the deeper levels from conduction band.

**Ключевые слова:** подвижность, пороговое напряжение, ток насыщения, протонное облучение, метод Ван-дер-Поля.

*(Получено 19 октября 2010 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

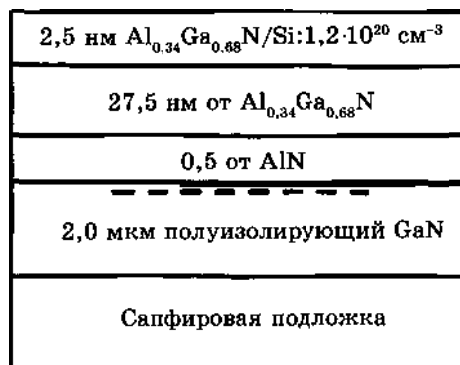
Нитридгаллиевые транзисторные структуры с высокой подвижностью электронов (HEMTs) являются перспективными структурами для применения в микроволновом диапазоне высокой мощности. Важными преимуществами этих структур является большая ширина запрещённой зоны и высокая подвижность электронов, что приводит к высокой плотности заряда и высокой плотности тока. Более того, структуры на основе нитридгаллиевых тонких плёнок применяются при модификации ширины запрещённой зоны. В дополнение, высокая температурная стабильность делает нитридгаллиевые структуры применимыми в высокочастотных высокоомощных приложениях. Структуры на основе нитрида галлия демонстрируют высокую радиационную стойкость [1, 2], значительно более высокую, чем арсенидгаллиевые структуры. Величина энергии порогового сдвига  $T_d$  вещества обратно пропорциональна значению постоянной решётки материала [1–3], и составляет для нитрида галлия  $a = 0,319$  нм и  $c = 0,519$  нм и  $a = 0,565$  нм для арсенида галлия соответственно [2, 4]. Электрофизические свойства структур на основе нитрида галлия представляют значительный интерес для использования в широкополосных коммуникационных системах благодаря высокой мощности и частоте этих приборов. Более того, структуры на основе арсенида галлия планируется использовать в космических системах, где существенно влияние электромагнитного излучения и интегральной плотности облучения частицами. Таким образом, радиационная стойкость электронных структур на основе нитрида галлия становится исключительно важной задачей.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Структура была выращена при помощи молекулярно-лучевой эпитаксии, и изолирующие области создавались при помощи ионного травления. Омические контакты, состоящие из последовательности Ti 20 нм–Al 120 нм–Ti 45 нм–Au 55 нм, и контакты Шоттки, состоящие из Ni 25 нм–Au 375 нм, формировались при помощи фотолитографии в соответствии со структурой транзисторов с высокой подвижностью. Анализ электрофизических параметров, включая измерение эффекта Холла методом Ван-дер-Поля, выполнялся при комнатной температуре. Спектры катодolumинесценции измерялись при комнатной температуре и при 10 К для набора транзисторных структур одной подложки. Результаты масс-спектрометрии вторичными ионами были получены для образцов без применения литографии.

Транзисторные структуры с нанесёнными контактами и материал без контактов облучались при комнатной температуре на ускорителе Ван-де-Граафа с плотностью потока протонов от  $10^9$  и  $10^{11}$  1/сек·см<sup>2</sup>, энергией протонов 1,8 МэВ и значением ионного тока 6 нА и 40 нА. Диапазон облучения составлял значение от плотности потока протонов  $3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> до  $3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. В процессе облучения и при получении спектров катодolumинесценции к образцам применялось заземление. После облучения образцы измерялись на четырёхконтактной установке при комнатной температуре с подключённым автоматизированным анализатором HP4156А параметров полупроводников.

Для данных структур различия в величинах ширины запрещённой зоны и спонтанной поляризации для GaN и AlN, —  $E_g(\text{GaN}) = 3,51$  эВ и  $E_g(\text{AlN}) = 6,25$  эВ,  $P_{sp}(\text{GaN}) = -2,9 \cdot 10^{-6}$  C/см<sup>2</sup> и  $P_{sp}(\text{AlN}) =$



**Рис. 1.** Схематическое изображение строения транзисторной структуры с высокой подвижностью электронов на основе AlGaN/AlN/GaN НЕМТ. Длина и ширина затвора составляют 1,0 мкм и 150 мкм.

$= -8,1 \cdot 10^{-6} \text{ С/см}^2$ , — приводят к образованию немонотонного разрыва на границе в зоне проводимости [10]. Для тринитрида  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  значение ширины запрещённой зоны может быть найдено при помощи формулы:

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xE_g(\text{AlN}) + (1-x)E_g(\text{GaN}) - b(1-x)x;$$

$b = 0,6 \text{ эВ}$  — параметр аппроксимации (bowing parameter [17]), а значения спонтанной поляризации могут быть найдены линейной экстраполяцией в соответствии с законом Вегарда с параметром аппроксимации равным  $C(P_{\text{sp}}) = -0,021 \text{ С/м}^2$ .

Значение ширины запрещённой зоны и значение спонтанной поляризации меньше для тринитрида  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , чем для нитрида алюминия  $\text{AlN}$ , значит и разница в зоне проводимости на границе раздела слоёв  $\Delta E_c$  меньше для тринитрида по сравнению с  $\text{AlN}$ . Для данных транзисторных структур подвижность носителей в канале сильно зависит от значения разницы в зоне проводимости на границе ( $\Delta E_c$ ) и, следовательно, подвижность носителей должна быть выше для транзисторных структур со слоем  $\text{AlN}$  в своём составе, по сравнению с обычными транзисторными структурами на основе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ . Действительно, результаты измерений подвижности методом Ван-дер-Поля при  $300 \text{ К}$  показали, что подвижность носителей для структуры со слоем  $\text{AlN}$  в составе составляла величину  $1600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$ , в то время как для транзисторной структуры на основе только  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  данное значение равнялось  $1000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{сек}$ .

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зависимости вольтамперных характеристик (ВАХ) от величины облучения для транзисторных структур с  $m$ -образным затвором приведены на рис. 2 и 3. Шаг значений дозы облучения изменяется в логарифмическом масштабе от  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  до  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

Из рисунков видно, что для транзисторных структур на основе  $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaN}$  не наблюдается изменений в статических характеристиках транзисторов до значения облучения в  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ . При увеличении дозы облучения протонов наблюдается резкое уменьшение тока истока, а также немонотонный сдвиг величины тока насыщения в направлении более положительных значений. При данной логарифмической шкале, зависимости от величины протонного облучения, данные изменения имеют резко выраженный характер с пороговым значением в  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  начала деградиационных процессов в транзисторной структуре. Отметим, что для образцов на основе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  отмечалась аналогичная пороговая зависимость ( $10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) как и для структур на основе  $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaN}$ .

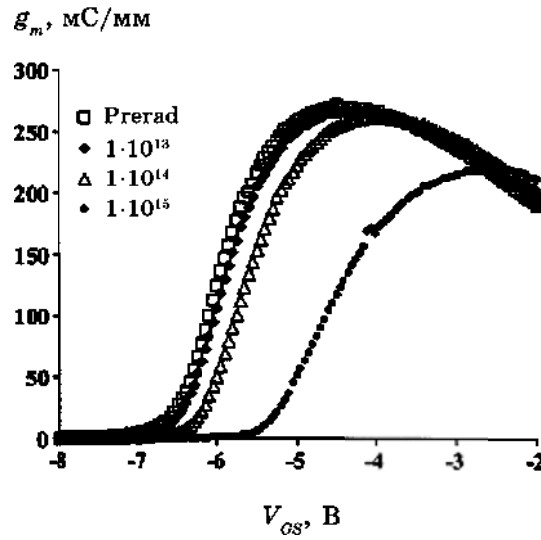


Рис. 2. Зависимость крутизны ВАХ  $g_m$  от  $V_{GS}$  транзистора на основе  $Al_xGa_{1-x}N/AlN/GaN$ -структуры от плотности протонного облучения в диапазоне от  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  до  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при  $300^\circ\text{C}$ .

На рисунке 3 показана зависимость максимальной крутизны тока ( $g_m$ ) при различных значениях интегральной плотности облучения. Значение максимальной крутизны тока, равное  $272 \text{ мС/мм}$  в исходном измерении, остаётся постоянным от облучения вплоть до величины  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  и затухает на  $55\%$  при плотности облучения в

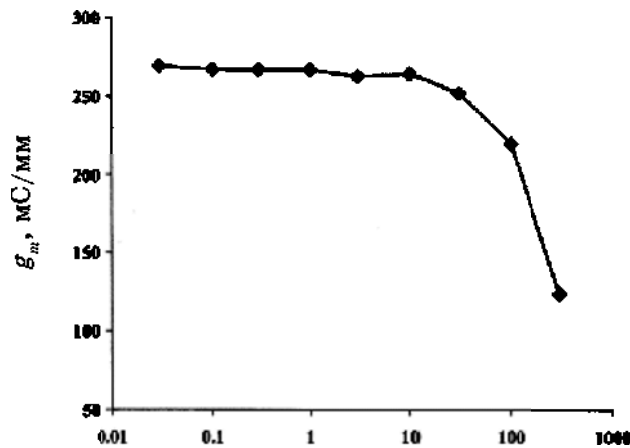


Рис. 3. Зависимость максимальной крутизны  $g_m$  транзистора на основе  $Al_xGa_{1-x}N/AlN/GaN$ -структуры от плотности протонного облучения в диапазоне от  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  до  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  при  $300^\circ\text{C}$ .

$3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

Концентрация носителей в канале для структур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  и  $\text{AlGaN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ , изображённая на рис. 4, оказывается одинаковой. Основным фактором, влияющим на концентрацию носителей, является уровень легирования соответствующего слоя. Уровень легирования для каждой из структур был одинаков, соответственно и концентрация носителей должна быть равной. Отметим, что для данных структур концентрация носителей в канале достигала значения в  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ , что часто является уровнем насыщения 2DEG-канала носителями из легированного поверхностного слоя.

Под влиянием протонного облучения наблюдается уменьшение концентрации носителей в канале для обеих структур. Существен-

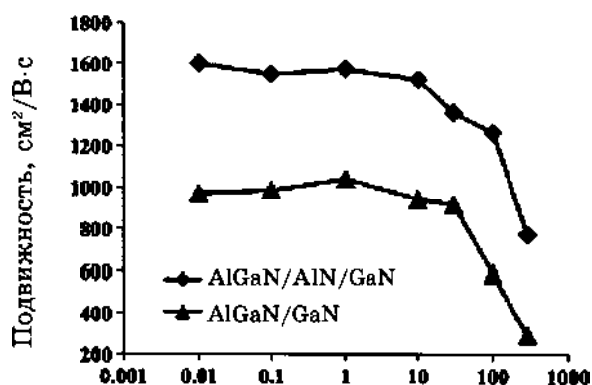


Рис. 4. Зависимость подвижности носителей, измеренной методом Ван-дер-Поля, от плотности облучения в диапазоне от  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  до  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  для  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  НЕМТ-структуры.

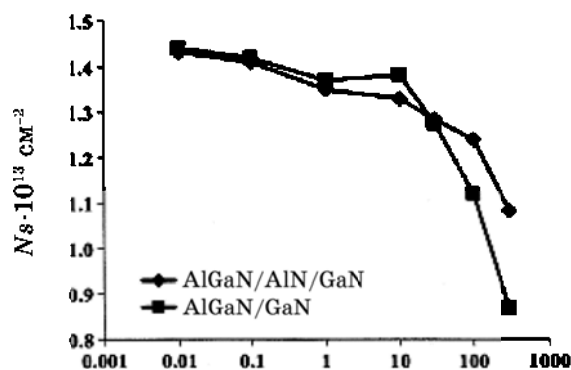


Рис. 5. Зависимость концентрации носителей в канале, измеренной методом Ван-дер-Поля, от величины протонного облучения для НЕМТ-структур на основе  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  и  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  при  $300^\circ\text{C}$ .

ное уменьшение концентрации носителей наступает после дозы облучения в  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>, и достигает различных значений для соответствующей структуры. Для структуры на основе Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN значения концентрации носителей уменьшается до  $0,85 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> и до  $1,1 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> для структуры AlGaN/AlN/GaN при плотности облучения в  $3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

Из рисунка 5 следует, что разный наклон кривых для Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN- и AlGaN/AlN/GaN-структур для носителей в канале означает разную радиационную стойкость к протонному облучению НЕМТ-структур с различным строением слоёв.

Дополнительный слой AlN в структуре Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlN/GaN приводит к увеличению подвижности носителей в канале вдвое при 300 К, что связано с резким уменьшением процесса рассеяния носителей в канале на границе AlN/GaN по сравнению с границей Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN.

Большая ширина запрещённой зоны AlN приводит к большему значению  $\Delta E_c$ , что означает большую локализацию волновой функции носителей в слое GaN.

Таким образом, в результате измерений установлено, что наличие дополнительного слоя AlN в транзисторных НЕМТ-структурах на основе тринитридов Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN обеспечивает повышенную подвижность носителей в канале, увеличенный диапазон радиационной стойкости структуры и, следовательно, улучшенные характеристики транзистора на этой структуре.

#### 4. ВЫВОДЫ

В работе исследовано влияние протонного облучения с энергией 1,8 МэВ на электрофизические характеристики НЕМТ-структур классического вида Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN и нового вида Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlN/GaN.

При увеличении плотности протонного облучения наблюдается затухание электрофизических характеристик транзистора в виде уменьшения тока насыщения, уменьшения максимальной крутизны ВАХ и уменьшения порогового напряжения в сторону положительных значений.

Влияние протонного облучения на изменения подвижности носителей и концентрации носителей в 2DEG-канале измерено из вольтамперных характеристик и при помощи измерений Ван-дер-Поля.

Структуры обоих видов продемонстрировали радиационную стойкость до порогового значения плотности  $1,8$  МэВ протонного облучения  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>, что делает эти транзисторные структуры применимыми в условиях повышенной радиации и космического пространства. Влияние протонов с более высокой энергией будет значительно меньше, чем протонов с энергией 1,8 МэВ [8].

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. S. M. Khanna, J. Webb, H. Tang, A. J. Houdayer, and C. Carlone, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **47**: 2322 (2000).
2. J. W. Corbett and J. C. Bourgoin, *Defect Creation in Semiconductors: Point Defects in Solids* (Eds. J. H. Crawford and F. F. Slifkin) (New York: Plenum: 1975), vol. 2.
3. A. Ionascut-Nedelcescu, C. Carlone, A. Houdayer, H. J. von Bardeleben, J.-L. Cantin, and S. Raymond, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **49**: 2733 (2002).
4. D. C. Look, D. C. Reynolds, J. W. Hemsky, J. R. Sixelove, R. L. Jones, and R. J. Molnar, *Phys. Rev. Lett.*, **79**, No. 12: 2273 (1997).
5. B. Luo, J. W. Johnson, F. Ren, K. K. Allums, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, A. M. Dabiran, A. M. Wowchack, C. J. Polley, P. P. Chow, D. Schoenfeld, and A. G. Baca, *Appl. Phys. Lett.*, **80**: 604 (2002).
6. B. Luo, J. W. Johnson, F. Ren, K. K. Allums, C. R. Abernathy, S. J. Pearton, R. Dwivedi, T. N. Fogarty, R. Wilkins, A. M. Dabiran, A. M. Wowchack, C. J. Polley, P. P. Chow, and A. G. Baca, *Appl. Phys. Lett.*, **79**: 2196 (2001).
7. S. J. Cai, Y. S. Tang, R. Li, Y. Wei, L. Wong, Y. L. Chen, K. L. Wang, M. Chen, Y. F. Zhao, R. D. Schrimpf, J. C. Keay, and K. F. Galloway, *IEEE Trans. Electron Devices*, **47**: 304 (2000).
8. X. Hu, B. K. Choi, H. J. Barnaby, D. M. Fleetwood, R. D. Schrimpf, S. C. Lee, S. Shojah-Ardalan, R. Wilkins, U. K. Mishra, and R. Dettmer, *Proc. 2002 Radiation and Its Effect on Components and Systems (RADEC) Workshop (September 2002, Padova, Italy)*.