

**Мартынов Я.Б.<sup>1</sup>, Синкевич В.Ф.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АО «НПП «Исток» им. Шокина»

<sup>2</sup>АО «НПП «Пульсар»

## **Лавинный пробой и лавинно-инжекционная неустойчивость в AlGaN-GaN полевых транзисторах**

*Представлены результаты моделирования лавинно-инжекционной неустойчивости и лавинного пробоя в мощных полевых транзисторах на гетероструктурах на основе нитрида галлия. Показано, что даже в случае отсутствия разогрева полупроводниковой решетки транзистора и при любом потенциале затвора максимальное напряжение исток-сток ограничено началом развития лавинно-инжекционной неустойчивости. Определены области напряжений, где существенную роль играет обычный лавинный пробой.*

**Ключевые слова:** гетероструктурный транзистор, лавинная инжекция, широкозонный полупроводник, лавинный пробой.

Термин «лавинная инжекция» впервые был введен Ганном в 1956 [1] году для описания явления, возникающего при протекании тока в структуре, состоящей из двух хорошо проводящих электрический ток электродов, между которыми помещено некое не очень хорошо проводящее электрический ток вещество. Оказывается, что вольтамперная характеристика такой структуры имеет S-образный вид, а резкое падение напряжения на образце вызвано тем, что область, в которой до начала переключения было мало носителей тока, заполняется носителями, инжектируемыми в нее с одной стороны из контакта, а с другой - из области ударной ионизации, что и дало Ганну повод назвать это явление лавинной инжекцией (ЛИ). С тех пор «пробой» подобного типа наблюдался и исследовался в диодных и транзисторных структурах [2,3].

Оказалось, что явление лавинной инжекции ответственно за разрушительный вторичный пробой во всех типах биполярных транзисторов [4].

В мощных полевых транзисторах наблюдался ряд необычных эффектов, приводящих к резкому росту тока и изломам на вольтамперных характеристиках этих приборов. В разных работах эти явления получили разные названия: паразитный биполярный эффект [5] или кинк-эффект [6]. Однако, последовательность событий, с помощью которой объясняются подобные эффекты, определенная в результате численного моделирования транзисторов характерна для лавинной инжекции. Необычная зависимость пробивного напряжения исток-сток от потенциала затвора была объяснена с помощью лавинной инжекции дырок вначале экспериментально [7], а затем это было подтверждено детальным численным моделированием [8,9].

Таким образом, резкое нарастание тока, связанное с лавинной инжекцией, носит довольно общий характер. ЛИ наблюдалась в диодах как со структурой n-i-n и p-i-p, так и p-i-n - структурой, транзисторах разных типов: в GaAs полевых транзисторах с затвором Шотки (ПТШ), МОП - транзисторах, транзисторах с высокой подвижностью (НЕМТ) [10], биполярных транзисторах. В последнее время появились и получили широкое распространение транзисторы с высокой подвижностью на широкозонных материалах –

AlGaN-GaN HEMT's. В этих транзисторах наблюдение эффектов, предположительно связанных с ЛИН крайне редко встречаются [11]. В настоящей работе с помощью численной модели [12] показано, что вольтамперные характеристики (ВАХ) AlGaN-GaN HEMT также имеют S-образный вид (рис.1).

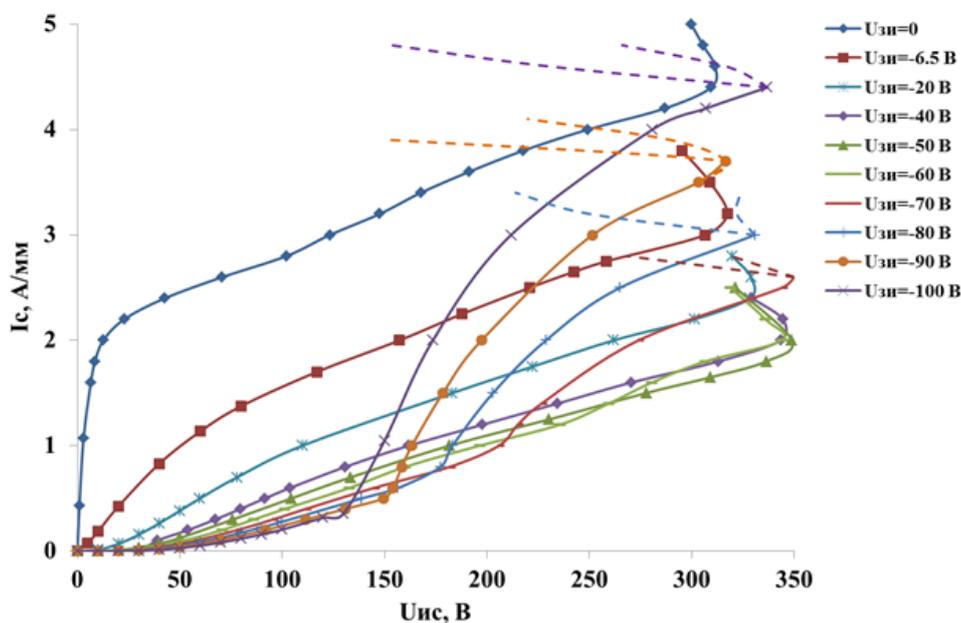


Рис. 1. ВАХ AlGaN-GaN HEMT.

При численном моделировании наблюдаются все характерные признаки развития лавинно-инжекционной неустойчивости. Это лавинная инжекция дырок из области сильного поля у стока в подложку, дрейф этих дырок к истоку и их накопление возле этого электрода со стороны подложки (рис.2(а)), понижение существующего в этой области потенциального барьера для электронов и возникающая из-за этого дополнительная инжекция электронов из канала в подложку (рис.2(б)). Все эти явления и приводят к появлению S-образности на ВАХ транзистора.

В тоже время AlGaN-GaN HEMT присущи и другие особенности, характерные для полевых транзисторов других типов. Например, наблюдается рост напряжения начала развития ЛИН с увеличением отрицательного потенциала затвора (рис.3), что связано с увеличением пути проходимого электронами и дырками от истока к стоку при увеличении  $U_{зи}$ . Наблюдается также явление разгибания барьера затвора положительным потенциалом стока (рис.4), что приводит к появлению заметных токов стока при больших отрицательных потенциалах затвора ( $U_{зи} \leq 20$  В).

В диапазоне напряжений  $-60 < U_{зи}$  (В)  $< 0$  наклон ВАХ транзистора определяют два физических эффекта: явление разгибания потенциального барьера затвора увеличивающимся потенциалом стока и лавинная инжекция. При  $U_{зи} \leq -60$  В начинает пробиваться промежуток затвор-сток. В этом диапазоне напряжений затвора наклон ВАХ определяется при малых потенциалах стока разгибанием потенциального барьера затвора, затем происходит лавинный пробой промежутка затвор-сток и крутизна ВАХ резко возрастает (при этом появляется значительный ток затвора). Лавинный ток постепенно насыщается из-за известного влияния объемного заряда лавины [13]. Дальнейшее увеличение тока стока может быть обеспечено лишь лавинной инжекцией, но в этих условиях (при заданном постоянном токе стока и лавинном пробое затвора) возникают незатухающие колебания потенциала стока. Напряжения, при которых происходит начало таких колебаний и отложено на рисунке 3, продолжающие кривую  $U_{лин}$  при  $U_{зи} \leq -60$  В.

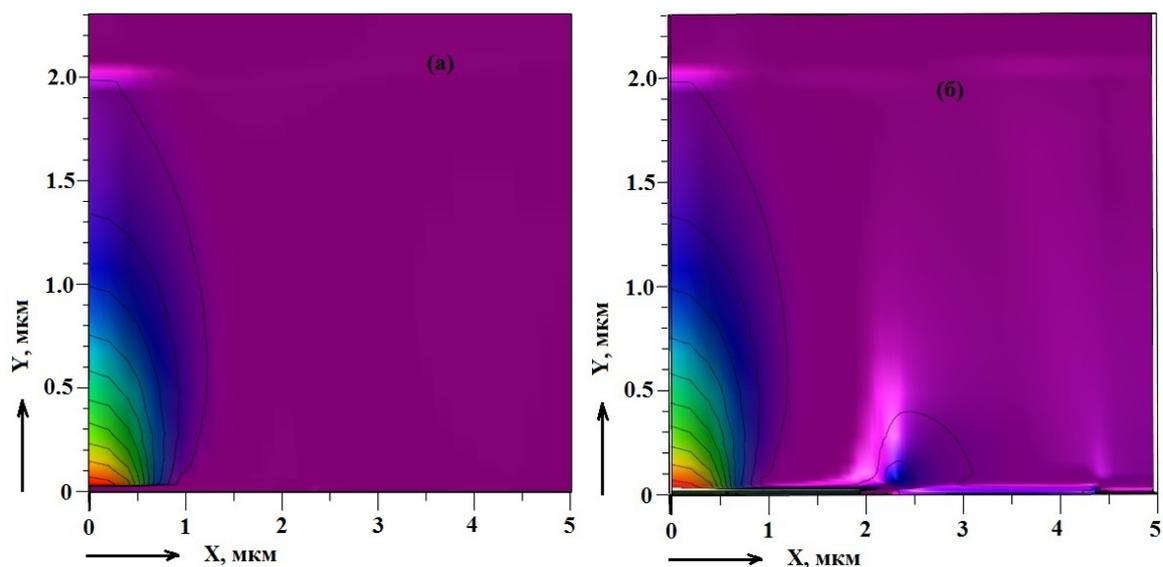


Рис. 2. Линии постоянной плотности дырок (а) и электронов (б) в сечении AlGaIn-GaN HEMT получены в области ВАХ, соответствующей развитой лавинной инжекции, при  $U_{зи}=0$ ,  $I_c=5$  А/мм. Красный цвет соответствует высокой, фиолетовый – низкой плотностям. Второй максимум электронной плотности при  $X \sim 2.3$  мкм – это домен сильного поля в канале транзистора у стокового края затвора.

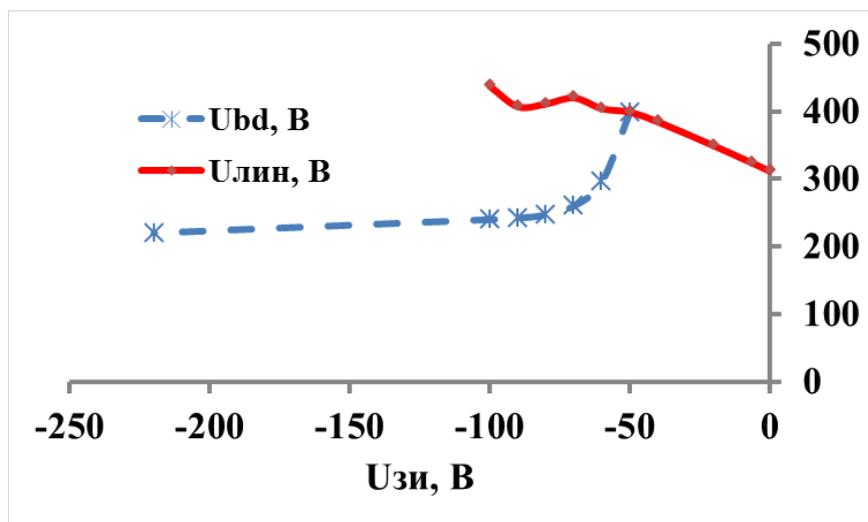


Рис. 3. Максимально возможная разность потенциалов затвор-сток, ограниченная лавинной инжекцией ( $U_{лин}$ ) и напряжение лавинного пробоя промежутка затвор-сток ( $U_{bd}$ ) от потенциала затвора.

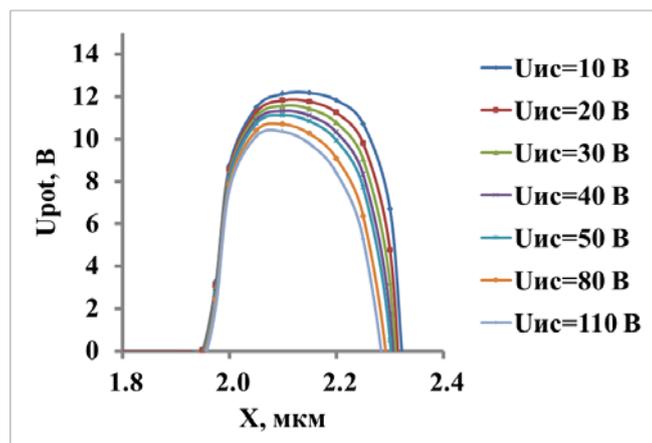


Рис. 4. Рассчитанная форма потенциального барьера создаваемого затвором в канале AlGaIn-GaN транзистора при разных потенциалах стока. Потенциал построен вдоль канала в области с максимальной электронной плотностью,  $Y=26$  нм.

Как видно из рисунка 3 напряжение лавинного пробоя затвор-сток не является постоянным, а растет с ростом потенциала затвора. Принято считать, что  $U_{bd}$  не должно зависеть от потенциала затвора, поскольку этот пробой связан с размером обедненной области в промежутке затвор-сток, зависящей в первом приближении только от разности потенциалов  $U_{зс}$ . Однако, как показывает анализ полученных численных решений, растущая разность потенциалов между истоком и стоком, при постоянной  $U_{зс}$ , увеличивает размер обедненной области в канале, созданной отрицательным потенциалом затвора (рис.5,6). Таким образом, даже при  $U_{зс}=\text{const}$ , но растущем  $U_{ис}$  увеличивается размер области с сильным электрическим полем и, следовательно, пробивное напряжение промежутка затвор-сток  $U_{bd}$ .

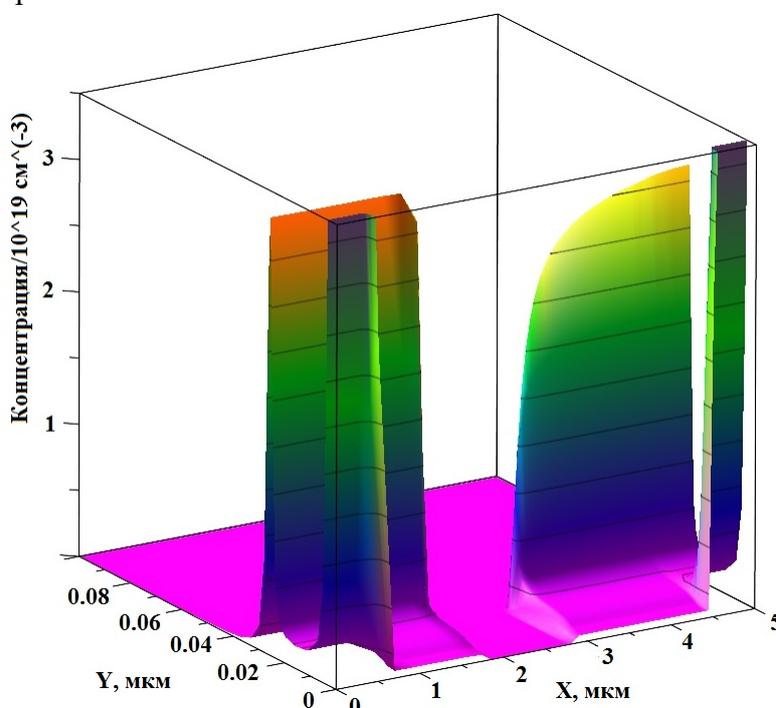


Рис. 5. Электронная плотность в сечении AlGaIn-GaN HEMT. Все электроды расположены в плоскости  $Y=0$ . Исток вдоль координаты  $X$  от 0 до 0.5 мкм, затвор от 2 до 2.3 мкм, сток от 4.5 до 5 мкм.

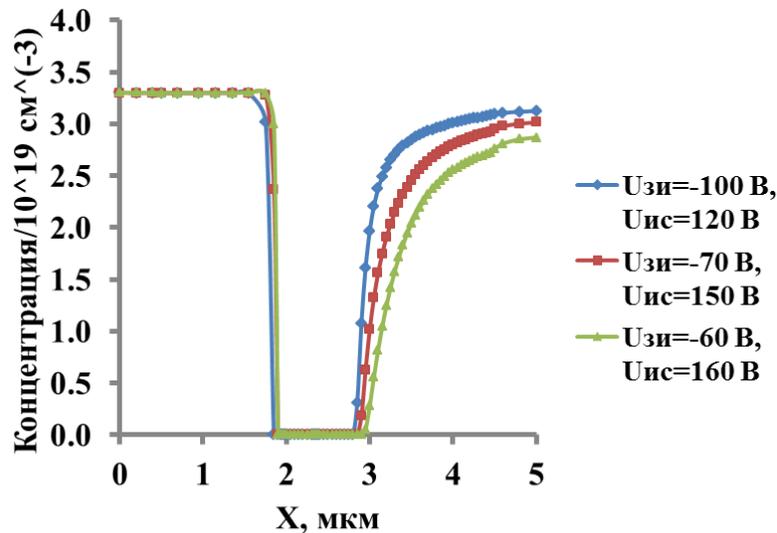


Рис. 6. Максимальная электронная плотность в канале AlGaIn-GaN транзистора при разных потенциалах стока и одинаковой разности потенциалов затвор-сток  $U_{зс} = -220$  В.  $Y = 26$  нм.

#### Библиографический список

1. Gunn J. B. Proc. Phys. Soc., B-69, 1956.
2. Gibson, A. F., and Morgan, J. R. "Avalanche injection diodes", Solid State. Electron., 1, 1, pp. 54-69., 1960.
3. Hoefflinger B. "High-Frequency Oscillations of p++-n+-n-n++ Avalanche Diodes below the Transit-Time Cutoff", IEEE Trans., Electron Devices, vol. ED-13, no.1, pp. 151-158, January 1966.
4. Hower, P. L., and Reddi, V. G. K. "Avalanche injection and second breakdown in transistors", IEEE Trans. Electron Devices, ED-17, 4, pp. 320-335, 1970.
5. B. J. Van Zeghbroeck, W. Patrick, H. Meier, and P. Vettiger, "Parasitic bipolar effects in submicrometer GaAs MESFET's," IEEE Electron Device Lett., vol. EDL-8, pp. 188-190, May 1987.
6. K. Kato, T. Wada, and K. Taniguchi, "Analysis of kink characteristics in silicon-on-insulator MOSFET's using two-carrier modeling," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-32, pp. 458-462, Feb. 1985.
7. Kozlov N.A., Sinkevitch V.F., Vashchenko V.A. "Isothermal current instability and local breakdown in GaAs FET", Electron. Lett. 28:1265-1267, 1992
8. Y. B. Martynov, A. S. Tager «Isothermal electric breakdown in MESFET's and MODFET's», 19'th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, Stockholm, Sweden, May 21-24, 1995.
9. N. A. Kozlov, Y. B. Martynov, V. F. Sinkevitch, A. S. Tager, V. A. Vashchenko «Negative differential conductivity and isothermal drain breakdown of GaAs MESFET's», IEEE Transactions on Electron Devices, v. ED-43, no. 4, p. 513-518, 1996.
10. T. Suemitsu, T. Enoki, N. Sano, M. Tomizawa, Y. Ishii, "An analysis of the kink phenomena in InAlAs/In-GaAs HEMT's using two-dimensional device simulation," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 45, pp. 2390-2398, Dec. 1998.
11. J. Kuzmik, D. Pogany, E. Gornik, P. Javorka, P. Kordos, «Electrostatic Discharge Effects in AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistors», Applied Physics Letters, 83, 4655, 2003.
12. Я.Б. Мартынов «Специальный вид граничных условий для системы уравнений низкотемпературной полупроводниковой плазмы», ЖВМ и МФ, т. 39, №2, стр. 309-314, 1999.
13. А.С. Тагер, В.М. Вальд-Перлов «Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ», «Советское радио», Москва, 1968.