

**В.М. Лукашин<sup>1</sup>, А.Б. Пашковский<sup>1</sup>, К.С. Журавлев<sup>2</sup>,  
А.И. Торопов<sup>2</sup>, В.Г. Лапин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ФГУП "Научно-производственное предприятие "Исток""

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова  
Сибирского отделения РАН

## **Мощный полевой транзистор на гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием**

*Представлены первые результаты разработки мощных полевых транзисторов на гетероструктурах на основе арсенида галлия с оптимизированной квантовой ямой и дополнительными потенциальными барьерами. Транзисторы при длине затвора 0,4 – 0,5 мкм и общей ширине затвора транзистора 0,8 мм на частоте 10 ГГц имеют коэффициент усиления более 8 дБ, удельную выходную мощность более 1,4 Вт/мм, КПД по добавленной мощности до 50%.*

**Ключевые слова:** гетероструктурный транзистор, планарное легирование

Мощные СВЧ транзисторы типа рНЕМТ (pseudomorphic high electron mobility transistor) на основе псевдоморфных AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур являются ключевым элементом устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов и поэтому во всем мире активно ведутся исследования, направленные на совершенствование конструкции гетероструктур и улучшение параметров таких приборов. Так как в соответствии с простейшей оценкой выходная мощность пропорциональна произведению рабочего тока на напряжение, то при разработке гетероструктур для мощных полевых транзисторов обычно стремятся добиться максимальной проводимости канала. Попытки оптимизации гетероструктур для мощных полевых рНЕМТ транзисторов сталкиваются с большим набором жестких физических и технологических ограничений, которые, на первый взгляд, не позволяют получать удельную выходную мощность серийных транзисторов заметно больше 1 Вт/мм [1]. Одним из важных механизмов, ограничивающих мощность гетероструктурных транзисторов, является поперечный пространственный перенос электронов между слоями гетероструктуры. Дело в том, что при субмикронной длине затвора ток, текущий через транзистор, определяется не только подвижностью и поверхностной плотностью электронов в канале, но и всплеском дрейфовой скорости электронов под затвором. В свою очередь, величина всплеска дрейфовой скорости зависит как от подвижности электронов, так и от поперечного переноса электронов в гетероструктуре и интенсивности рассеяния электронов в широкозонном материале, особенно при положительных напряжениях на затворе транзистора [2]. В данной работе для увеличения плотности электронов в канале, и сохранения высокой проводимости канала в условиях сильного термо-полевого разогрева электронов за счет уменьшения поперечного переноса электронов в гетероструктуре и подавления выброса горячих электронов из – InGaAs канала транзистора, предлагается создать дополнительные потенциальные барьеры для электронов, сформированные с помощью специального профиля донорно-акцепторного легирования слоев вокруг канала.

Простейшие оценки показывают, что в этом случае число горячих электронов в широкозонном материале при открытом затворе может уменьшиться в несколько раз. На этом пути, однако, существует серьезная технологическая проблема получения достаточно высоких и резких потенциальных барьеров для горячих электронов. Использование AlGaAs гетеробарьеров не дает нужного эффекта, так как ширина запрещенной зоны при повышении содержания алюминия увеличивается не достаточно сильно. Кроме того, в слоях AlGaAs с большим содержанием алюминия ( $X_{Al} > 0,35$ ) формируются глубокие DX центры, захватывающие электроны, и происходит инверсия долин в зоне проводимости [3], что резко усиливает интенсивность рассеяния горячих электронов, проникающих в широкозонные слои [4]. Выход можно искать в планарном биполярном легировании гетероструктур [5-7]. При объемном легировании [8] потенциальные барьеры получаются слишком плавными и не оказывают положительного влияния на параметры прибора, зато наличие акцепторной примеси в буферном слое приводит к многочисленным технологическим проблемам.

В настоящей работе дополнительные высокие потенциальные барьеры с практически вертикальными стенками сформированы в AlGaAs-слоях, обрамляющих канал транзистора с помощью использования специального профиля примесного легирования. Профиль примесного легирования был выбран в виде  $p^+ - i - \delta n$  структур, имеющих избыточное легирование донорами. При этом встроенное электрическое поле в этих структурах способствует переходу электронов из n-дельта-слоя в канал транзистора, что увеличивает проводимость канала гетероструктуры. Схематическая зонная диаграмма структуры AlGaAs-InGaAs-GaAs с  $p^+ - i - \delta n$  структурами показана на рис.1.

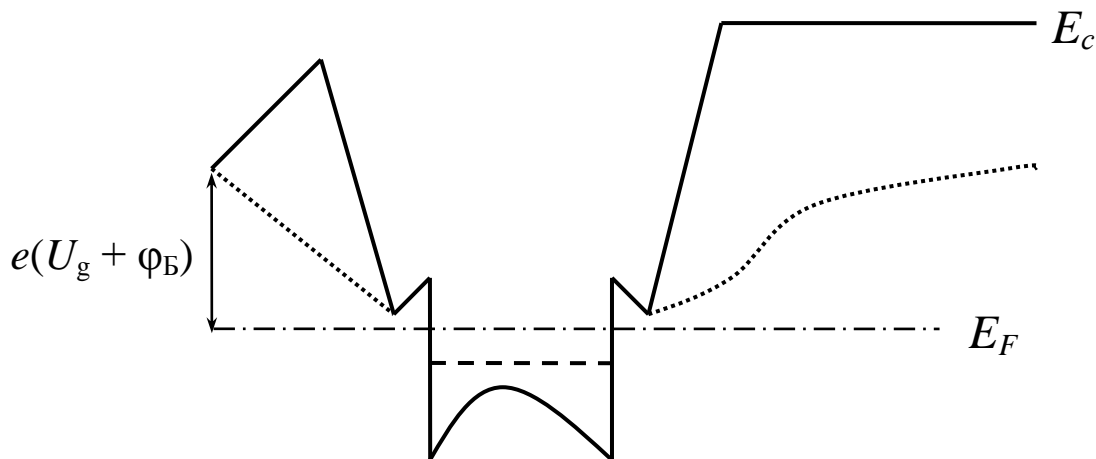


Рис. 1.

Здесь  $e$  – заряд электрона,  $\phi_B$  – потенциал барьера Шоттки,  $U_g$  – напряжение на затворе,  $E_F$  – уровень Ферми. Точками обозначена зонная диаграмма обычной  $p$ HEMT-структуры без планарного легирования акцепторами.

Расчеты показывают, что высота потенциальных барьеров для электронов в канале, формируемых с помощью примесного легирования, может достигать ширины

запрещенной зоны широкозонных слоев, при этом потенциальный рельеф в области барьеров существенно изменяется на нескольких нанометрах, а концентрация электронов в канале может превышать величину  $5,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Экспериментально AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктуры были выращены в ИФП СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии слоев на установке типа Comrast 21 (Рибер, Франция). Холловские измерения гетероструктур показали достаточно большие поверхностные концентрации электронов  $n_s = 4,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при подвижности электронов  $\mu = 5300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Далее, на данных структурах по методике, описанной в работах [9,10], были изготовлены мощные полевые транзисторы со смещенным затвором длиной 0,4 – 0,5 мкм при общей ширине затвора 0,8 мм. Следует отметить, что транзисторы имели обычный затвор с удельным сопротивлением металлизации 100 Ом/мм, а не Т-образный с удельным сопротивлением около 20 Ом/мм. Ранее, при такой конструкции транзистора, удельная мощность лучших образцов, изготовленных на двойных гетероструктурах ИФП СО РАН и Санкт-Петербурга, не превосходила 0,9 Вт/мм.

Измерения показали, что новый прибор имеет достаточно малые токи утечки по подложке и гладкие ВАХ в области отсечки, что свидетельствует о том, что ток горячих электронов в широкозонном материале со стороны подложки – мал (рис. 2).

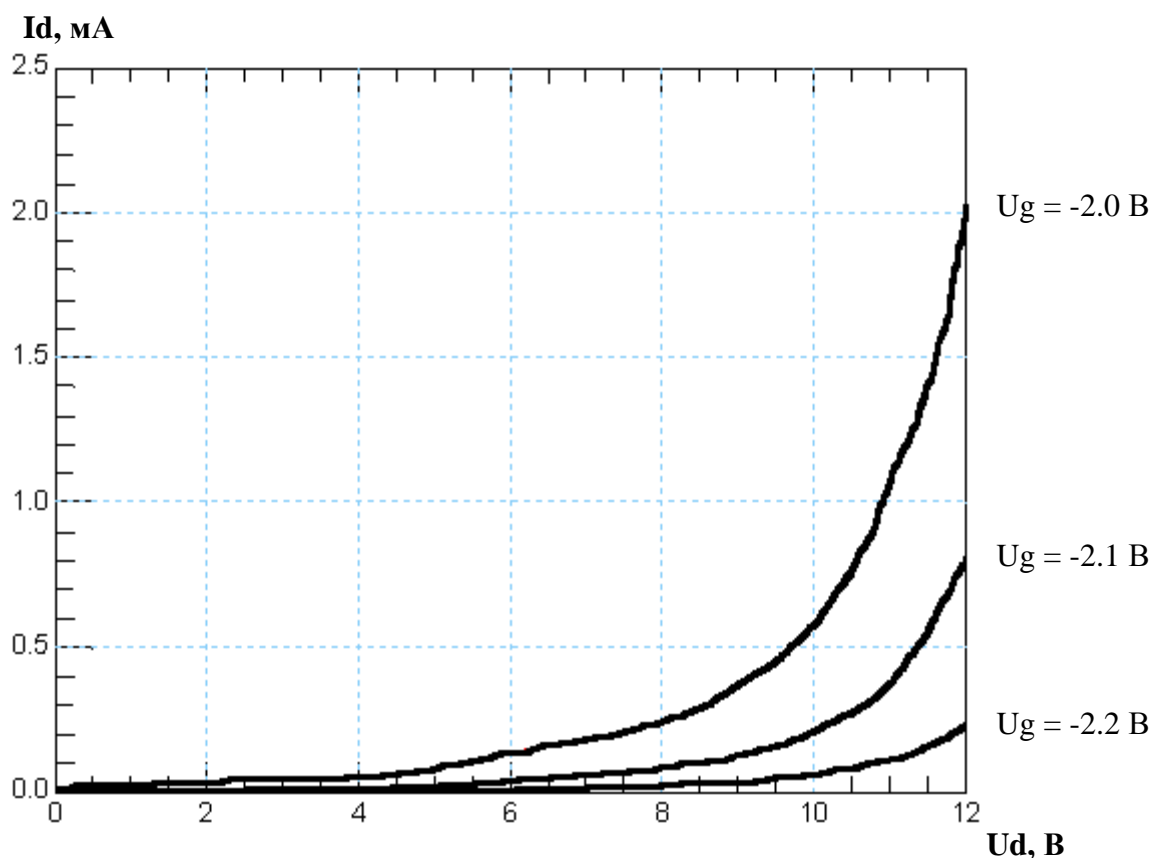


Рис.2.

На рис. 2 изображена ВАХ исследуемого транзистора в режиме близком к режиму лавинного пробоя.

Транзисторы демонстрируют не слишком высокие пробивные напряжения 14 – 15 В что свидетельствует о необходимости дальнейшей оптимизации прибора и технологического процесса его изготовления. Для СВЧ измерений транзисторы монтировались на держатели с 50-Омными линиями и вставлялись в специальную оправку с согласующими трансформаторами на входе и выходе, которыми проводилась настройка прибора на максимальную мощность. Результаты исследований приведены в таблице I.

Таблица I

№	$P_{\text{входа}}$ , мВт	$P_{\text{выхода}}$ , мВт	$K_p$ , Дб	$I_{\text{стока}}$ , мА	$U_{\text{затвора}}$ , В	$U_{\text{стока}}$ , В	КПД	$P_{\text{вых}}/L_g$ , Вт/мм	
<b>1</b>	10	135	11,2	160	-0,61	8			
	50	535	10,2	180	-0,56	8			
	100	880	9,4	210	-0,49	8		1,1	
	150	1040	8,4	220	-0,47	8	50	1,3	
	170	1070	8	230	-0,49	8	49	1,34	
	10	140	11,4	160	-0,61	9			
	50	525	10,2	190	-0,56	9			
	100	900	9,5	220	-0,47	9		1,12	
	150	1100	8,7	230	-0,45	9	46	1,38	
	170	1140	8,3	240	-0,5	9	45	<b>1,42</b>	
	<b>2</b>	10	110	10,4	150	-0,56	8		
50		445	9,5	160	-0,56	8			
100		750	8,75	190	-0,54	8		0,94	
150		1010	8,3	210	-0,52	8	51	1,26	
170		1075	8	220	-0,50	8	51	1,34	
10		100	10	160	-0,65	9			
50		410	9,1	190	-0,61	9			
100		740	8,7	200	-0,58	9		0,92	
150		1050	8,45	230	-0,52	9	43	1,31	
170		1150	8,3	240	-0,5	9	45	<b>1,44</b>	
<b>3</b>		170	1090	8,1	240	-0,8	8	48	1,36
	10	90	9,5	225	-0,55	9			
	50	450	9,5	250	-0,55	9			
	100	780	8,9	270	-0,49	9		0,97	
	150	1060	8,5	270	-0,53	9	38	1,33	
	170	1140	8,3	270	-0,58	9	40	<b>1,42</b>	

Из приведенных данных видно, что транзисторы, полученные на структурах с дополнительными потенциальными барьерами, демонстрируют рост удельной выходной мощности более чем в полтора раза (она достигает величин более 1,4 Вт/мм), достаточно высокие КПД по добавленной мощности (до 50%), и коэффициент

усиления более 8 дБ на частоте 10 ГГц. Мы полагаем, что оптимизация конструкции гетероструктур и СВЧ транзисторов может дополнительно повысить их параметры.

#### Библиографический список

1. TriQuint Semiconductor, Advance Product Information, September 19, 2005 Web: [www.triquint.com](http://www.triquint.com).
2. А.В.Климова, В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский "Поперечный пространственный перенос в полевых транзисторах на гетероструктурах с селективным легированием и границы применимости квазигидродинамических моделей" ФТП, 2009, Т.43, В.1, стр. 113-118.
3. А.К.Saxena J.Phys. C., 13 no23, pp 4322-4334 (1980)..
4. З.С.Грибников, О.Э.Райчев ГХ – Перенос в реальном пространстве: вклад рассеяния на междолинных фононах. ФТП 1989 т.23, в 12. с.2171-2178.
5. Zou, J., Abid, Z., Dong, H., Gopinath, A.. 'Reduction of real-space transfer in depletion-mode dipole heterostructure field-effect transistors' Applied Physics Letters. Vol. 58, No. 21 (1991), p. 2411-2413.
6. J. Zou, H. Dong, A. Gopinath, and M. S. Shur, *Performance and Optimization of Dipole Heterostructure Field Effect Transistor*, IEEE Trans. Electron Devices, IEEE Trans. Electron Devices, ED-39, No. 2, pp. 250-256, Feb. (1992).
7. Патент РФ на полезную модель №80069 по заявке № 2008133793. Приоритет от 19.08.2008. Гетероэпитаксиальная структура для полевых транзисторов// Е.И.Голант, К.С.Журавлев, В.Г.Лапин, В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский, Ю.Н.Свешников.
8. М.Шур Современные приборы на основе арсенида галлия. Москва, Мир. 1991. с.312.
9. V.G. Lapin, A.M. Temnov, K.I. Petrov, V.A. Krasnik *GaAs Microwave Offset Gate Self-Aligned MESFET's and their applications*. GaAs 2000 Conference proceedings, 2nd-3rd October 2000" p.314-317.
10. Лапин В.Г., Красник В.А., Петров К.И., Темнов А.М *Мощные GaAs полевые СВЧ транзисторы со смещенным затвором* Одиннадцатая Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Сборник материалов конференции 10-14 сентября 2001 г., Севастополь, Крым, Украина, стр. 135-136.