

**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> ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского  
отделения РАН

## **Перспективы развития полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием**

*Представлены первые результаты разработки мощных полевых транзисторов на гетероструктурах на основе арсенида галлия с квантовой ямой и дополнительными потенциальными барьерами на основе слоев с разными типами легирования, оптимизированными для уменьшения поперечного пространственного переноса электронов и увеличения эффекта размерного квантования. Транзисторы продемонстрировали рост выходной мощности в два раза, при длине трапецевидного затвора 0,4 – 0,5 мкм и общей ширине затвора транзистора 0,8 мм на частоте 10 ГГц в непрерывном режиме работы. При этом коэффициент усиления превысил 9,5 дБ при удельной выходной мощности более 1,6 Вт/мм и величине КПД по добавленной мощности до 50%. Проведена оценка перспектив развития данного типа приборов.*

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

Стремительное улучшение характеристик мощных полевых транзисторов на основе широкозонных материалов, особенно на основе нитрида галлия [1] и их использование в различных типах усилителей мощности почти ни у кого не оставляет сомнений в том, что традиционные мощные СВЧ транзисторы типа рНЕМТ на основе псевдоморфных AlGaAs-InGaAs-GaAs гетероструктур в ближайшее время будут практически полностью вытеснены из сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн. Однако результаты, приведенные далее, заставляют существенно пересмотреть данное предположение. 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 [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.

Профиль примесного легирования был выбран в виде  $p^+ - i - \delta n$  структур, имеющих избыточное легирование донорами [3]. При этом встроенное электрическое поле в этих структурах способствует переходу электронов из n-дельта-слоя в канал транзистора, что увеличивает проводимость канала гетероструктуры. Экспериментально AlGaAs-InGaAs-

GaAs гетероструктуры были выращены в ИФП СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии и содержали следующие основные слои, представленные в таблице. 1:

Таблица 1

№ слоя	Слой транзисторной гетероструктуры. Назначение	Состав. $x_{AlAs}, y_{InAs}$	Толщина	Уровень легирования, $N_{si}$
0	Полуизолирующая GaAs подложка	-	400 мкм	SI, (WT)
1	Буферный слой GaAs	-	400 нм	i
2	CP AlGaAs 6нм/GaAs 5нм x 12	0,25/-	-	
3	Барьерный слой i-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,25	100 нм	i
4	Барьерный слой p <sup>+</sup> -Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,25	15 нм	$4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
5	Барьерный слой i-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,25	5 нм	i
6	Дельта-легированный Si -Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,25	-	$(7,7 \div 8,2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
7	Спейсер i-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,25	3 нм	i
8	Сглаживающий слой i-GaAs	-	3 нм	i
9	Канал In <sub>y</sub> Ga <sub>1-y</sub> As	0,165	14 нм	i
10	Сглаживающий слой i-GaAs	-	1,5 нм	i
11	Спейсер i-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,25	3 нм	i
12	Дельта-легированный Si -Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,25	-	$(7,0 \div 7,5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
13	Барьерный слой i-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,25	7 нм	i
14	Барьерный слой p <sup>+</sup> -Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,25	8 нм	$5,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
15	Барьерный слой i-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,25	6 нм	i
16	Стоп - слой i-Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	0,86 ÷ 0,9	3 нм	i
17	Барьерный слой i-GaAs	-	27 нм	i
18	Контактный слой n+-GaAs	-	52 нм	$4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Холловские измерения гетероструктур, показали достаточно большие поверхностные концентрации электронов  $n_s = 4,0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при подвижности электронов  $\mu = 5300 \text{ см}^2/(\text{В} \times \text{с})$ . На данных структурах по методике [4,5], 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 T – 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 СПб АУ НОЦНТ РАН, не превосходила 0,9 Вт/мм. Типичные результаты измерения выходной мощности разработанных транзисторов (партии 1, 2) на частоте 10 ГГц приведены в таблице 2.

Таблица 2

№	$P_{\text{входа}}$ , мВт	$P_{\text{выхода}}$ , мВт	$K_p$ , Дб	$U_{\text{стока}}$ , В	КПД	$P_{\text{вых}}/W_g$ , Вт/мм
<b>1</b>	10	135	11,2	8		
	170	1070	8	8	49	1,34
	10	140	11,4	9		
<b>2</b>	170	1140	8,3	9	45	<b>1,42</b>
	10	110	10,4	8		
	170	1075	8	8	51	1,34
<b>3</b>	10	100	10	9		
	170	1150	8,3	9	45	<b>1,44</b>
	170	1090	8,1	8	48	1,36
<b>3</b>	10	90	9,5	9		
	170	1140	8,3	9	40	<b>1,42</b>

Видно, что в партиях 1, 2 транзисторы продемонстрировали в непрерывном режиме величину удельной выходной мощности более 1,3 - 1,4 Вт/мм, коэффициент усиления более 8 дБ, КПД около 50% [6,7]. В партии 3 транзисторы в непрерывном режиме продемонстрировали величину удельной выходной мощности более 1,6 Вт/мм, коэффициент усиления более 9 дБ, КПД около 50% (таблица 3):

Таблица 3

№	$P_{\text{входа}}$ , мВт	$P_{\text{выхода}}$ , мВт	$K_p$ , Дб	$U_{\text{стока}}$ , В	КПД	$P_{\text{вых}}/W_g$ , Вт/мм
<b>1</b>	150	1280	9,3	9	46	<b>1,60</b>
<b>2</b>	150	1145	8,9	8	51,8	1,43
	150	1310	9,4	9	<b>52,6</b>	<b>1,64</b>

В импульсном режиме (длина импульса  $\tau = 10$  мкс, скважность  $Q = 4$ ) результаты, полученные на транзисторах из партии 38, выглядят еще более впечатляюще:

Таблица 4

№	$P_{\text{входа}}$ , мВт	$P_{\text{выхода}}$ , мВт	$K_p$ , Дб	$U_{\text{стока}}$ , В	КПД	$P_{\text{вых}}/W_g$ , Вт/мм
<b>1</b>	140	1258	9,5	8	56	<b>1,57</b>
	150	1420	9,8	9	49	<b>1,78</b>

В таблице 5 представлен ряд параметров как новых транзисторов (3 партии), так и приборов, изготовленных на обычных структурах (4 разные партии).

Таблица 5

Транзистор	Сопротивление истока (Ом)	Напряжение насыщения (Вольт)	Пробивное напряжение (Вольт)
рНЕМТы	0,9	1,5	15,5÷21
Партия 1	1,5	2	13,5÷15
Партия 2	1,5	2,2	14,5÷16
Партия 3	2	2,5	16÷18

Видно, что технология изготовления транзисторов на новых гетероструктурах пока далека от совершенства – первые две партии транзисторов продемонстрировали не слишком высокие пробивные напряжения. Сопротивление истока в партиях 1, 2 в полтора раза, а в партии 3 – более чем в два раза превышает сопротивление истока в транзисторах на обычных гетероструктурах, изготовленных в СПб АУ НОЦНТ РАН. Увеличение сопротивлений связано, по всей видимости, с тем, что наличие акцепторной примеси требует изменения режима формирования омических контактов.

Элементарные оценки показывают, что улучшение омических контактов для данных гетероструктур в непрерывном режиме позволит:

Сместить оптимальную рабочую точку на ВАХ с 9 В на 8 В.

Увеличить удельную выходную мощность до величин более 1,7 Вт/мм

Увеличить КПД в режиме настройки на максимальную мощность до 55 ÷ 60%

Увеличить коэффициент усиления в режиме настройки на максимальную мощность до 10 ÷ 10,5 дБ.

Необходимо отметить, что исследуемая структура является исключительно экспериментальной и была разработана на основе опыта разработки и применения гетероструктур без локализирующих барьеров с типичными толщинами слоев и поверхностными плотностями электронов в канале исключительно для выявления физического эффекта. Поэтому можно предположить, что только оптимизация структуры позволит увеличить уровень удельной мощности до 2 Вт/мм. Как отмечалось выше, эксперименты были проведены на типичном серийно выпускаемом мощном транзисторе с трапециевидным затвором. Можно ожидать, и это на наш взгляд крайне пессимистическая оценка, что введение Т-образного или Г-образного затвора длиной менее 0,25 мкм (если не сработает какой-нибудь новый, неизвестный пока эффект) дополнительно увеличит мощность, позволит заметно увеличить коэффициент усиления и КПД, а также позволит на частоте 10 ГГц выйти на следующий уровень параметров транзисторов:

Удельная мощность более 2,5 Вт/мм.

Коэффициент усиления в насыщении более 13 дБ.

КПД при настройке на максимальную мощность 55 ÷ 60%.

Коэффициент усиления 13 дБ для мощного транзистора – избыточный и использование таких приборов может быть затруднено из-за проблем с самовозбуждением. Однако он позволяет ввести в такие приборы полевой электрод [8], и заметно увеличить их выходную мощность. Ранее в X-диапазоне использование полевого электрода было затруднено из-за резкого уменьшения коэффициента усиления. Однако если приведенные оценки окажутся верны, то за счет введения полевого электрода можно будет выйти на уровень 5 Вт/мм при коэффициенте усиления 8-9 дБ, то есть на уровень параметров транзисторов на основе нитрида галлия. Правда в этом случае остро встанет проблема отвода тепла от активной области прибора, и транзисторы придется делать на подложках толщиной не более 25 мкм или искать новые технические решения, например [9].

Еще более перспективным выглядит использование гетероструктур с донорно-акцепторным легированием в миллиметровом диапазоне длин волн. Сейчас лучшие образцы GaN транзисторов на частоте 40 ГГц демонстрируют малосигнальный коэффициент усиления около 7 дБ при длине затвора 80 нм [10]. Если приведенные выше оценки верны, то на новых структурах этот же коэффициент усиления можно будет получить в насыщении мощности при длине затвора 0,25 мкм.

Не менее перспективным выглядит применение данного технического приема в маломощных транзисторах. Простая грубая оценка [11] показывает, что при прочих равных условиях коэффициент шума обратно пропорционален коэффициенту усиления

$$F_{\min} \sim 1/K_y$$

а коэффициент усиления в транзисторах на новых гетероструктурах почти в 2 раза выше, чем на обычных, однако корректно ответить на этот вопрос может только разработка специальных вариантов конструкции структур с донорно-акцепторным легированием для маломощных транзисторов и изготовление приборов на их основе.

Одно из возможных достоинств разработанных гетероструктур – это уменьшение числа горячих электронов, уходящих в буфер, улучшение управления током при высоких

напряжениях на затворе. Данный эффект может иметь важное самостоятельное значение. Введение высокого потенциального барьера для горячих электронов со стороны буфера может решить проблемы управляемости GaN транзисторов при нанометровых длинах затворов, и возможно, проблемы токов утечки в цифровой технике при переходе к транзисторам с длинами затворов порядка 10 нм.

Полученные результаты и проведенные оценки позволяют предположить, что если в ближайшее время не произойдет существенное улучшение характеристик транзисторов на основе GaN (например, за счет усиления локализации горячих электронов в канале при использовании того же донорно-акцепторного легирования), то они могут существенно утратить свои доминирующие позиции в X-диапазоне и на более высоких частотах.

#### Библиографический список

1. Кищинский А.А. *Твердотельные СВЧ-усилители мощности на нитриде галлия – состояние и перспективы развития*. – Материалы 19-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь, Вебер, 2009, с.11–16.
2. TriQuint Semiconductor, Advance Product Information, September 19, 2005 Web: [www.triquint.com](http://www.triquint.com).
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. К.С.Журавлев, В.Г.Лапин, В.М. Лукашин, А.Б.Пашковский, А.Б.Соколов, А.И.Торопов “ *Серийный рHEMT с удельной мощностью 1,4 Вт/мм* ” Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2012, В.1(512), С. 55- 61.
7. В.М. Лукашин, А.Б.Пашковский, К.С.Журавлев, А.И.Торопов, В.Г.Лапин, А.Б.Соколов “*Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов* ” Письма в ЖТФ, 2012, т.38., в. 17, стр. 84-89.
8. Y-F Wu, A. Saxler, M. Moore, R.P. Smith, S. Sheppard, P.M. Chavarkar, T. Wisleder, U.K. Mishra, and P.Parikh, “*30-W/mm GaN HEMTs by Field Plate Optimization*,” IEEE Electron Dev. Lett., vol. 25, pp. 117-119, Nov.2004.
9. Патент РФ №2463685 по заявке № 2011123071. Приоритет от 07.06.2011. *Мощный полевой транзистор*// А.А.Воробьев, А.В.Галдецкий, В.Г.Лапин.
10. IEEE Electron Device Letters, 2012, vol. 33, № 9, p. 1258-1260.
11. И.А.Баранов, А.В.Климова, Л.В.Манченко, О.И.Обрезан, А.Б.Пашковский “*Влияния глубоких уровней в буферном слое на характеристики транзисторов и малошумящих усилителей при воздействии импульсов СВЧ мощности на входе*” Радиотехника, 2006 г. № 3, с. 34-42.