

*Пашковский А.Б., Новиков С.И., Лапин В.Г.,  
Лукашин В.М.  
АО «НПП «Исток» им. Шокина»*

## **Анализ особенностей обращённых гетероструктур с донорно – акцепторным легированием**

*Предложена модификация обращённой гетероструктуры путём встраивания в структуру легированного акцепторами слоя, формирующего дополнительный потенциальный барьер, уменьшающего поперечный пространственный перенос горячих электронов в подложку. Согласно проведенным расчетам такая структура имеет разность энергий между уровнями размерного квантования в несколько раз превышающую энергию оптического фона в GaAs и повышенную линейность передаточной характеристики.*

**Ключевые слова:** Обращённая гетероструктура, поперечный пространственный перенос.

Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ), использующие различные виды гетероструктур, продолжают демонстрировать рекордные характеристики [1-3]. Их часто называют транзисторами с двумерным (2D) электронным газом, хотя до последнего времени в рабочих режимах их отличие от приборов с объёмным легированием канала определялось практически только тем, что в них канал формировался в сравнительно узкозонном нелегированном полупроводнике с высокой подвижностью электронов (соответственно с большим всплеском дрейфовой скорости под затвором) при незначительном влиянии размерного квантования [4]. Лишь с появлением гетероструктур с донорно – акцепторным легированием (DA-pHEMT) [5,6] появилась дополнительная возможность - возможность использования усиленного размерного квантования для управления характеристиками переноса горячих электронов в канале [7]. Отдельный тип структур, в которых при работе полевых транзисторов могут проявляться квантовые эффекты, представляют собой обращённые гетероструктуры [8,9] главная особенность которых, в отличие от традиционных структур [10-12], – сужение, а не расширение квантовой ямы при увеличении напряжения на затворе [13], а, соответственно, увеличение, а не уменьшение расстояния между подзонами размерного квантования. Однако, для использования в высокочастотных полевых транзисторах такая конструкция имеет существенный недостаток. В ней электроны разогреваясь, из узкого канала попадают в широкий и ничем по существу не ограниченный слой широкозонного материала с высокой интенсивностью рассеяния, что должно приводить к заметному падению подвижности в сильных полях. Однако, этот эффект может быть заметно ослаблен формированием дополнительного потенциального барьера методом донорно – акцепторного легирования (рис.1(а, б, в)). Такая конструкция может иметь ряд существенных преимуществ перед обычной структурой [10-12], особенно при работе транзисторов в коротковолновой части мм и ТГц диапазоне длин волн. Во-первых, она позволяет существенно приблизить квантовую яму к затвору, то есть, как уменьшить затворные краевые эффекты, а значит увеличить быстродействие, так и заметно увеличить крутизну транзистора, что, соответственно, сильно уменьшит влияние паразитных элементов. Во-вторых, при квазиупругом обратном рассеянии горячих электронов на

большие углы, даже в DA-DpHEMT гетероструктурах [6], при размерном квантовании особенности спектра поперечной компоненты импульса приводят к существенному уменьшению вероятности переходов горячих электронов в состояния с импульсом, имеющим большую поперечную компоненту. Кроме этого, разность энергий между уровнями размерного квантования заметно превышает энергию оптического фонона [6], что в числе прочих факторов приводит к заметному уменьшению вероятности обратного рассеяния горячих электронов. Следствием этого является увеличение всплеска дрейфовой скорости электронов под затвором, а соответственно увеличение быстродействия и коэффициента усиления таких приборов [7]. Предлагаемая обращённая структура имеет более узкую квантовую яму по сравнению с DA-DpHEMT гетероструктурами [6], более сильно выраженный эффект размерного квантования и, поэтому, ещё более перспективна в этом плане. Для более подробного анализа структуры уровней обращённых гетероструктур было проведено их моделирование на основе численного самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона.

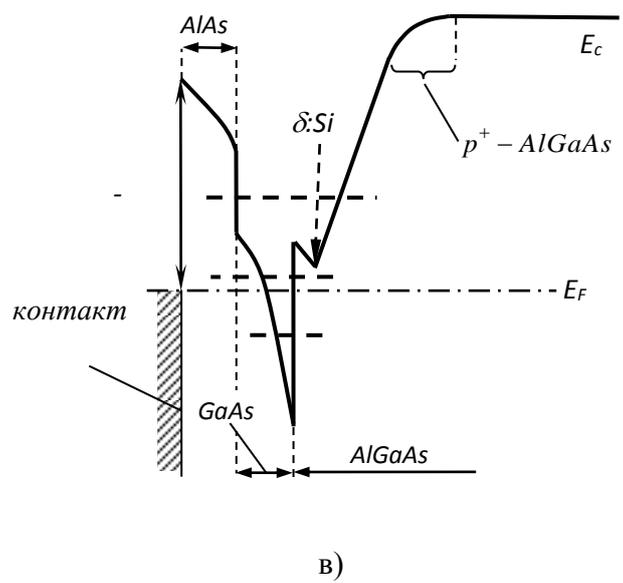
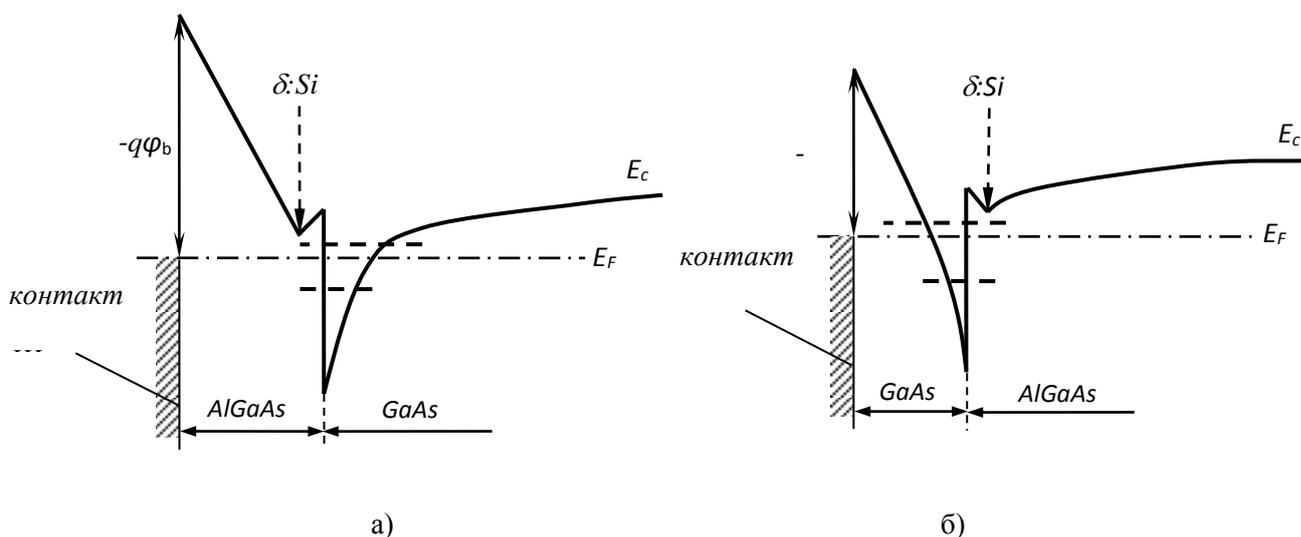


Рис. 1. Схематические зонные диаграммы: (а) - обычной *HEMT* – структуры, (б) - обращенной структуры, (с) - обращенной структуры с легированным акцепторами слоем  $p^+$ -*AlGaAs* и слоем широкозонного материала (*AlAs*) у затвора. Здесь  $q$  – заряд электрона  $\phi_b$  – потенциал барьера Шоттки.

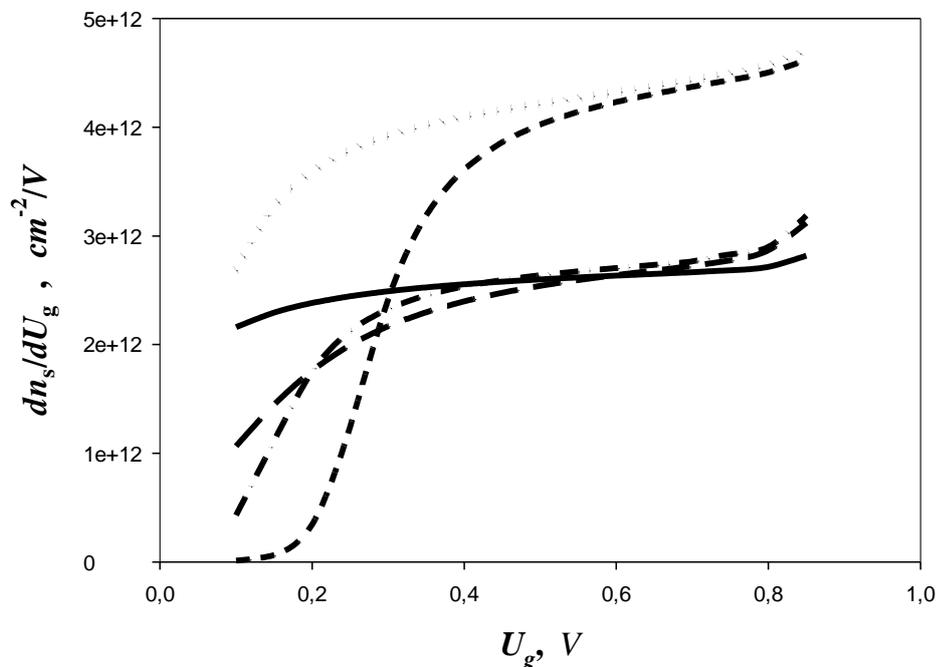


Рис. 2. Зависимости скорости изменения поверхностной плотности электронов от напряжения на затворе:

- (————) обращенная гетероструктура вариант № 1 в таблице 1;
- (— — —) прямая гетероструктура вариант № 2 в таблице 1;
- (— • — • —) прямая гетероструктура вариант № 3 в таблице 1;
- (---) обращенная гетероструктура вариант № 4 в таблице 1;
- (•••) обращенная гетероструктура с дополнительным барьером вариант №5 в таблице 1.

Таблица 1.

№	Слои структур.	x	Толщины слоев [нм] / уровни легирования [см <sup>-3</sup> ]				
			Варианты структур:				
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
1	Барьерный слой $Al_xGa_{1-x}As$	0,35	$100/10^{14}$	-	$100/10^{14}$	$100/10^{14}$	$100/10^{14}$
2	Барьерный слой $p^+ Al_xGa_{1-x}As$	0,35	-	-	-	$1/6 \cdot 10^{19}$	$1/6 \cdot 10^{19}$
3	Барьерный слой $-Al_xGa_{1-x}As$	0,35	-	-	-	$5/10^{14}$	$5/10^{14}$
4	Слой $n^+ - Al_xGa_{1-x}As (\delta:Si)$	0,35	$1/2 \cdot 10^{19}$	-	-	$1/8 \cdot 10^{19}$	$1/9 \cdot 10^{19}$
5	Спейсер - $Al_xGa_{1-x}As$	0,35	$2/10^{14}$	-	-	$2/10^{14}$	$2/10^{14}$
6	Канал - GaAs	-	$7/10^{14}$	$100/10^{14}$	$7/10^{14}$	$7/10^{14}$	$7/10^{14}$
7	Спейсер $Al_xGa_{1-x}As$	0,35	-	$2/10^{14}$	$2/10^{14}$	-	-
8	Слой $n^+ - Al_xGa_{1-x}As (\delta:Si)$	0,35	-	$1/2 \cdot 10^{19}$	$1/2 \cdot 10^{19}$	-	-
9	Барьерный слой - $Al_xGa_{1-x}As$	0,35	-	-	-	-	$4/10^{14}$
10	Барьерный слой $p^+ - Al_xGa_{1-x}As$	0,35	-	-	-	-	-
11	Барьерный слой - AlAs	1,0	-	-	-	-	$5/10^{14}$
12	Барьерный слой - $Al_xGa_{1-x}As$	0,35	$20/10^{14}$	$17/10^{14}$	$17/10^{14}$	$10/10^{14}$	$1/10^{14}$
13	Металл затвора, $\phi_B$ [эВ]	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

На рис. 2 приведены вычисленные зависимости удельной скорости изменения заряда электронов в квантовой яме – по существу удельной емкости ( $dQ/dU_g$ ) для различных структур (таблица 1) при изменении напряжения на затворе  $U_g$ . При данных параметрах структур разница между структурой с донорным легированием и структурой с донорно – акцепторным легированием, при той же поверхностной плотности некомпенсированных доноров, в масштабе рисунка практически отсутствует. Также при одинаковом легировании крайне незначительно отличие между обращённой структурой с донорно – акцепторным легированием и структурой с дополнительным барьером (вариант № 5 в таблице 1).

Главной особенностью обращённых структур оказывается линейность характеристики ( $dQ/dU_g$ ) в широком диапазоне изменения напряжений на затворе. Такое поведение также может служить предпосылкой к постоянству крутизны транзистора ( $g_m=dI_d/dU_g$ ) на основе таких структур. Здесь  $I_d$  – ток стока. Постоянство этих двух параметров, в свою очередь, дает существенные преимущества при разработке высокочастотных транзисторов средней и малой мощности с пониженным уровнем амплитудных и фазовых шумов [14,15]. Ещё одно достоинство такой конструкции, заключается в том, что для увеличения рабочих частот крутизну в ней можно дополнительно увеличивать, уменьшая толщину структуры (рис. 2). Интересно, что в такой структуре из-за большого расстояния между уровнями интенсивное заполнение второй размерно-квантовой подзоны начинается при довольно больших поверхностных плотностях электронов (рис. 3).

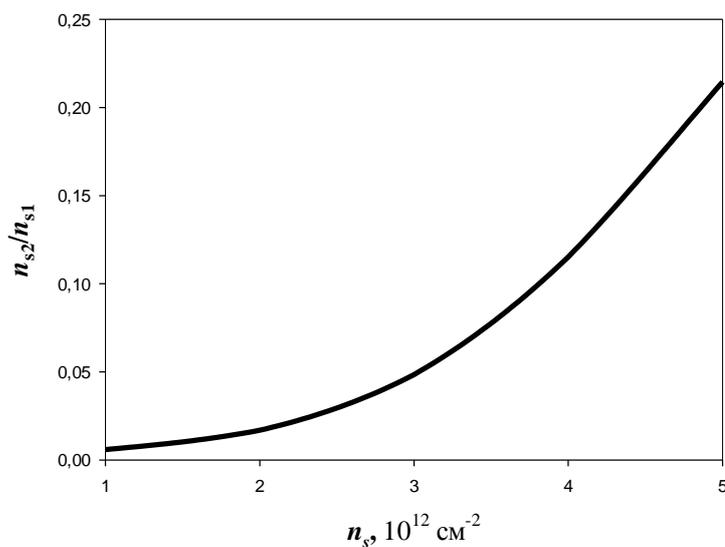


Рис. 3 Зависимость относительной заселённости первых двух уровней обращенной структуры (таблица 1, вариант № 4) при изменении поверхностной плотности доноров в  $\delta$  - слое № 4 от  $7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  до  $11 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

Естественно, особенности характеристик подобных систем сильно зависят от особенностей их строения. Как пример, рассмотрим результаты расчетов разности энергий от уровня  $E_i$  с номером  $i$  до уровня Ферми, заселённости  $n_{si}$  и разности энергий между ближайшими уровнями  $\Delta E_{(i+1),i}$  для первых пяти уровней (таблица 2) в модельной структуре (таблица 1, вариант № 5) при разных напряжениях на затворе  $U_g$ .

Таблица 2.

$U_g = +0.9V$				$U_g = +0.1V$		
$i$	$E_i$ , мэВ	$\Delta E_{(i+1),i}$ мэВ	$n_{si}$ , $cm^{-2}$ ( $n_s = 3.36 \cdot 10^{12}$ )	$E_i$ , мэВ	$\Delta E_{(i+1),i}$ мэВ	$n_{si}$ , $cm^{-2}$ ( $n_s = 2.32 \cdot 10^{12}$ )
1	-116	142	$3.09 \cdot 10^{12}$	25	158	$2.28 \cdot 10^{11}$
2	25	105	$2.53 \cdot 10^{11}$	183	91	$7.47 \cdot 10^8$
3	130	129	$6.00 \cdot 10^9$	274	163	$2.08 \cdot 10^7$
4	260	87	$4.03 \cdot 10^7$	437	107	$4.27 \cdot 10^4$
5	348		$1.41 \cdot 10^6$	545		$6.48 \cdot 10^2$

Как отмечалось выше, расстояния между квантовыми уровнями в такой гетероструктуре оказываются больше, чем в двойных структурах с донорно – акцепторным легированием [6] даже при больших положительных смещениях на затворе (при сильном обогащении канала электронами). Усиление размерного квантования, в принципе, может приводить к сильному падению интенсивности рассеяния горячих электронов и соответственно, к росту их дрейфовой скорости под затвором, к увеличению быстродействия полевых транзисторов. Тем самым открываются новые перспективы использования таких гетероструктур в приборах субмиллиметрового диапазона длин волн. Уточнить величину этих эффектов можно в результате расчёта вероятности рассеяния горячих электронов с учётом размерного квантования поперечной компоненты импульса электронов. Большой интерес представляют также результаты экспериментальных измерений полевой зависимости дрейфовой скорости электронов в таких структурах.

## Библиографический список

1. X. Mei; W. Yoshida, M. Lange, J. Lee et.al // IEEE Electron Device Letters, 2015, V.36, №4, p.327 – 329.
2. G. Moschetti, A. Leuther, H. Maßler, B. Aja et.al //IEEE Microwave and Wireless Components Letters 2015, V.25, №9, p.618 – 620.
3. Y. Campos-Roca; A. Tessmann; B. Amado-Rey; S. Wagner et.al//IEEE Microwave and Wireless Components Letters 2014, V.24 , №11, p.787 – 789.
4. А.А.Кальфа, А.Б.Пашковский // ФТП, 1988, Т.22. В.11. С. 2090-2092.
5. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Соколов А.Б. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 17. С. 84–89.
6. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Голант Е.И., Капралова А.А. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 5. С. 684–692.
7. Борисов А.А. и др // Письма в ЖТФ, 2016, Т. 42, В. 16, С.41 – 47
8. А.С. 897062 (СССР). Полевой транзистор. А.С.Тагер, А.А.Кальфа. Приоритет от 0.3.09.1980.
9. Кальфа А.А., Тагер А.С. Гетероструктуры с селективным легированием и их применение в полевых транзисторах СВЧ // Электронная Техника Сер.1, Электроника СВЧ, 1980, В. 12(348), С. 26 – 38.
10. A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped GaAs/n-AlxGa1-xAs Heterostructures / T. Mimura, S. Hiyamizi, T. Fuji, K.Numbu // Jap. Journ. Appl. Phys. 1980, V.19, № 5, P. L225 – L227.
11. High – Electron Mobility Transistors with Selectively Doped GaAs/n-AlGaAs Heterojunction / T. Mimura, S. Hiyamizi, H. Hashimoto, M. Fukuta // IEEE Trans. on Electron Dev., 1980, V. ED-27, № 11, P. 2197.
12. Two – Dimensional Electron GaAs MESFET Inversion Channels / D. Delagebeaudeuf, P. Delescluse, P.Etinne a.o. //Electron Lett., 1980, V. 16, № 17, P. 667 – 668.
13. D. Delagebeaudeuf, N.T.Linch Chage Control of the Heterojunction Two Dimensional Electron Gas for MESFET Aplcation // IEEE Trans. on Electron Dev., 1981, V. ED-28, № 7, P. 790 – 795.
14. Богданов Ю.М., Пашковский А.Б., Тагер А.С. // Микроэлектроника, 1993, Т 22, В.2, С.15-19.
15. [Богданов Ю.М., Пашковский А.Б., Тагер А.С.//Радиотехника и Электроника, 1993, Т 33, В.2, С. 346-355.