

# Полевые транзисторы миллиметрового диапазона длин волн АО «НПП «Исток» им. Шокина» на гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием

С.А. Богданов<sup>1</sup>, А.К. Бакаров<sup>2</sup>, К.С. Журавлёв<sup>2</sup>, В.Г. Лапин<sup>1</sup>, В.М. Лукашин<sup>1</sup>, А.Б. Пашковский<sup>1</sup>, И.А. Рогачёв<sup>1</sup>, Е.В. Терёшкин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Институт физики полупроводников им Академика А.В. Ржанова СО РАН

**Аннотация:** Представлены результаты разработки полевых транзисторов миллиметрового диапазона длин волн на псевдоморфных гетероструктурах  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As - In_{0.22}Ga_{0.78}As - Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  с донорно – акцепторным легированием. На частоте 40 ГГц при длине T-образного затвора 0.14 мкм транзисторы имеют коэффициент усиления более 18 дБ, на частоте 67 ГГц более 14 дБ, пробивное напряжение затвор – сток 23 – 31 В и удельную плотность тока при открытом затворе 0,6 – 0,7 А/мм.

**Ключевые слова:** полевой транзистор, коэффициент усиления, гетероструктура

## Введение

В настоящее время продвижение мощных полупроводниковых приборов в миллиметровый диапазон длин волн связано, в основном, с совершенствованием эпитаксиальных технологий нитрида галлия. Однако при освоении миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн полевыми транзисторами с высокой подвижностью электронов (HEMT), используют различные виды гетероструктур. Лидерами по коэффициенту усиления пока остаются гетероструктуры с квантовыми ямами на основе узкозонных материалов [1-3]. Кроме того, перспективным направлением выглядит применение в традиционных гетероструктурах дополнительного донорно-акцепторного легирования [4,5], успешно показавшее себя в сантиметровом диапазоне. Дополнительно введенные в структуру транзистора акцепторные слои, приводят к увеличению высоты потенциальных барьеров, ограничивающих область канала, тем самым уменьшая поперечный пространственный перенос горячих электронов из квантовой ямы в подложку и увеличивая роль размерного квантования. Это открывает возможность использования эффектов размерного квантования для управления характеристиками переноса горячих электронов в канале. Усиление размерного квантования 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 миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн.

## Экспериментальные исследования

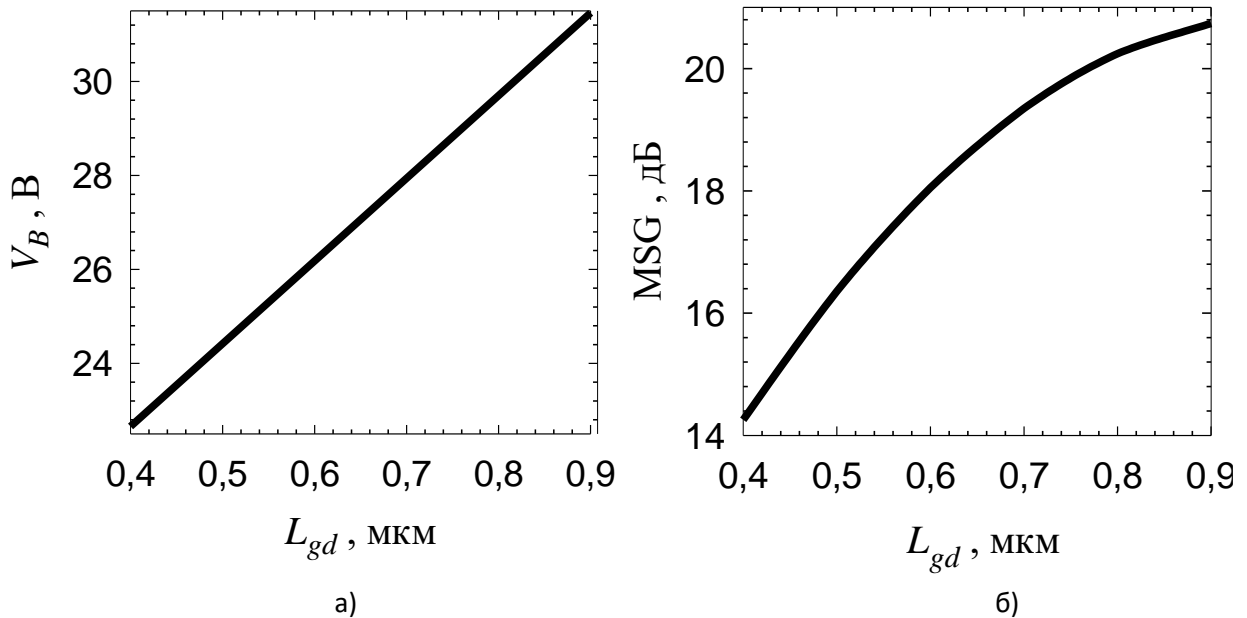
С момента первых разработок транзисторы на гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием продемонстрировали существенное увеличение коэффициента усиления по мощности, по сравнению с приборами на традиционных гетероструктурах. Так, разработанные мощные транзисторы в серийном исполнении при общей ширине затвора 0,8 мм и более, и длине одного затворного пальца 70 мкм при измерении в X-диапазоне продемонстрировали почти двукратный рост удельной выходной мощности, доведя её до уровня 1,7 Вт/мм, и коэффициента усиления на 3 –

4 дБ. На основании проведенных исследований транзисторов на гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием и транзисторов на традиционной гетероструктуре показано [6], что приборы на новой структуре обладают более высокочастотными свойствами и могут быть применимы в миллиметровом диапазоне длин волн без существенного уменьшения длины и ширины затвора. Очевидно, что уменьшение длины пальцев и общей ширины затвора должно существенно улучшить высокочастотные свойства прибора.

Для проверки эффективности использования донорно-акцепторного легирования в миллиметровом диапазоне длин волн были изготовлены полевые транзисторы с донорно – акцепторным легированием на псевдоморфных гетероструктурах  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As} - \text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As} - \text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  с длиной T – образного затвора 0,14 мкм, длинами пальцев от 50 мкм до 150 мкм.

### Результаты измерений

Транзисторы продемонстрировали очень высокие статические и СВЧ характеристики. Зависимости пробивного напряжения и максимального коэффициента усиления (MSG) на частоте 40 ГГц, рассчитанные по измеренным S параметрам, от расстояния затвор - сток приведены на рис.1.



**Рисунок 1.** Зависимости пробивного напряжения а) коэффициента усиления транзистора на частоте 40 ГГц при напряжении на стоке 4 В от расстояния затвор - сток.

При этом удельная плотность тока при открытом затворе составляет 0,6 – 0,7 А/мм. На частоте 67 ГГц прибор демонстрирует усиление более 14 дБ, на 94 ГГц около 10 дБ

### Заключение

Анализируя полученные данные можно сделать вывод что донорно-акцепторное легирование является эффективным способом улучшения характеристик транзисторных гетероструктур, а транзисторы на этих гетероструктурах могут работать даже в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Можно также предположить [7], что применение донорно – акцепторного легирования в гетероструктурах с более глубокими квантовыми ямами [8]  $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$  или  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As} - \text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As} - \text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  может ещё существенно улучшить эти

результаты.

#### Список литературы

1. Samoska L.A. An overview of solid-state integrated circuit amplifiers in the submillimeter-wave and THz regime // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, No 1. – p 9–24
2. R. Gavande et al. W – band heterodine receiver module with 27 K noise temperature // IEEE MTT-S Digest –2012 – p.1-3.
3. C. Zech, A. Hulsmann, R. Weber, A. Tessmann, S. Wagner, M. Schlechtweg, A. Leuther, O. Ambacher A Compact 94 GHz FMCW Radar MMIC based on 100 nm InGaAs mHEMT Technology with Integrated Transmission Signal Conditioning // 2013 8th European Microwave Integrated Circuits Conference, p: 436 – 439
4. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Соколов А.Б. Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов // Письма в Журнал технической физики, 2012, т.38., №. 17, стр. 84-89.
5. Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Голант Е.И., Капралова А.А. Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием // Физика и Техника Полупроводников, 2014, том 48, №.5, с. 684-692.
6. Борисов А.А., Пашковский А.Б., Лукашин В.М., Лапин В.Г., Щербаков С.В., Маковецкая А.А., Журавлев К.С., Торопов А.И. Анализ малосигнальных СВЧ характеристик DA-HEMT// Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника, 2016., №1, с. 65 – 69.
7. Пашковский А.Б., Новиков С.И., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Мартынов Я.Б. Особенности всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-PHEMT// Письма в Журнал технической физики, 2018, том 44, №. 17 с.103 – 110.
8. Васильевский И.С., Виниченко А.Н., Каргин Н.И. Электронные транспортные свойства и морфология структур с метаморфной квантовой ямой  $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As} - \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ // В сборнике: МОКЕРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 2017. С. 28-29.