

07

Полевой транзистор миллиметрового диапазона длин волн на основе псевдоморфной гетероструктуры с дополнительными потенциальными барьерами

© С.А. Богданов¹, А.К. Бакаров², К.С. Журавлев², В.Г. Лапин¹, В.М. Лукашин¹, А.Б. Пашковский^{1,¶},
И.А. Рогачёв¹, Е.В. Терёшкин¹, С.В. Щербаков¹

¹АО „НПП „Исток“ им Шокина“, Фрязино, Московская обл., Россия

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

¶ E-mail: solidstate10@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 29 декабря 2020 г.

Принято к публикации 29 декабря 2020 г.

Представлены результаты исследования полевых транзисторов миллиметрового диапазона длин волн с T -образным затвором длиной $0.14\ \mu\text{m}$ 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 дополнительными потенциальными барьерами на основе двустороннего донорно-акцепторного легирования канала. На частоте $40\ \text{GHz}$ в широком диапазоне напряжений на затворе достигнута величина максимально стабильного коэффициента усиления более $15\ \text{dB}$. Максимальная частота генерации прибора составляет около $250\ \text{GHz}$, удельная плотность тока при открытом канале — около $0.7\ \text{A/mm}$, пробивное напряжение затвор–сток в зависимости от исполнения составляет $22-31\ \text{V}$.

Ключевые слова: дополнительные потенциальные барьеры, полевой транзистор, коэффициент усиления.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.07.50802.18640

В настоящее время активное продвижение мощных полупроводниковых приборов в миллиметровый диапазон длин волн связано в основном с совершенствованием эпитаксиальных технологий нитрида галлия. Полевые транзисторы на основе гетероструктур $\text{AlGaIn}-\text{GaIn}$ демонстрируют крайне впечатляющие характеристики [1,2] и продвинулись почти до терагерцевого диапазона [3]. Более высокие частоты заняты приборами с узкозонными каналами, сформированными в основном на InP -подложках [4,5]. В то же время по высокочастотным свойствам GaIn заметно уступает GaAs [6,7]. При этом работы по совершенствованию транзисторов на основе арсенид-галлиевых псевдоморфных гетероструктур практически остановлены. Бурный прогресс в продвижении нитрид-галлиевых приборов, возможно, связан не только с достоинствами эпитаксиальных структур на основе нитрида галлия, но и с огромным объемом затрачиваемых на их развитие средств, а также резко выросшим за последние годы уровнем полупроводниковых технологий. В то же время исследования в области донорно-акцепторного легирования [8] позволили увеличить выходную мощность арсенид-галлиевых транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур. Кроме того, по оценкам [9–11] имеется возможность существенно продвинуться вверх по частотному диапазону.

В настоящей работе приведены первые результаты исследования арсенид-галлиевых полевых транзисторов миллиметрового диапазона длин волн на основе псевдоморфных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием (DA-DpHEMT), которые позволяют сделать вывод о больших перспективах этого направления.

Основные параметры слоев гетероструктуры с $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ -каналом на подложке GaAs ($100\ \mu\text{m}$), а также результаты измерений в ней поверхностной плотности и подвижности электронов приведены в таблице. Следует отметить, что данная структура имеет рекордное среди транзисторных структур этого типа значение поверхностной проводимости канала ($\sigma = e\mu n_s \approx 4.4\ \text{mS}$). На ее основе были изготовлены транзисторы как с различным количеством, так и с различной шириной пальцев затвора (от 50 до $150\ \mu\text{m}$). Измеренная длина T -образного затвора составила около $0.14\ \mu\text{m}$. Пробивное напряжение затвор–сток в зависимости от расстояния затвор–сток (рис. 1) изменялось в диапазоне $22-31\ \text{V}$, удельная плотность тока при открытом затворе составляла около $0.7\ \text{A/mm}$, что по элементарным оценкам соответствует удельной плотности мощности $1.5-2\ \text{W/mm}$.

Возможность улучшения частотных характеристик полевых транзисторов за счет использования донорно-акцепторного легирования была исследована на мощных DA-DpHEMT с затвором длиной $0.3\ \mu\text{m}$ [9]. Было показано, что донорно-акцепторное легирование увеличивает коэффициент усиления такого прибора на $3-4\ \text{dB}$, а при идеальном согласовании на частоте $40\ \text{GHz}$ мало-сигнальный коэффициент усиления достигает $5\ \text{dB}$. Из простейших оценок, основанных на пропорциональности коэффициента усиления транзистора квадрату его граничной частоты усиления по току f_t , следует, что уменьшение длины затвора с 0.3 до $0.14\ \mu\text{m}$ с учетом краевых эффектов должно приводить к увеличению f_t примерно в 2 раза, что соответствует росту коэффициен-

Гетероструктура DA-DpHEMT: состав слоев, уровень легирования, подвижность и поверхностная плотность электронов

№ п/п	Состав слоя	Концентрация примеси	Толщина, Å
1	Буфер		
2	Al _{0.25} Ga _{0.75} As		1000
3	Al _{0.25} Ga _{0.75} As:Be	2.55 · 10 ¹⁸ cm ⁻³	150
4	Al _{0.25} Ga _{0.75} As		36
5	GaAs		9
6	δ-Si (1)	6.0 · 10 ¹² cm ⁻²	
7	GaAs		15
8	Al _{0.43} Ga _{0.57} As		31
9	GaAs		9
10	In _{0.22} Ga _{0.78} As		100
11	GaAs		9
12	Al _{0.55} Ga _{0.45} As		23
13	GaAs		9
14	δ-Si (2)	9.5 · 10 ¹² cm ⁻²	
15	GaAs		15
16	Al _{0.33} Ga _{0.67} As		23
17	Al _{0.25} Ga _{0.75} As		30
18	Al _{0.33} Ga _{0.67} As		23
19	Al _{0.25} Ga _{0.75} As:Be	4.83 · 10 ¹⁸ cm ⁻³	80
20	Al _{0.25} Ga _{0.75} As		200
	<i>n_s</i> (300 K)	4.73 · 10 ¹² cm ⁻²	
	<i>μ</i> (300 K)	5780 cm ² /(V · s)	
	<i>n_s</i> (77 K)	4.81 · 10 ¹² cm ⁻²	
	<i>μ</i> (77 K)	13 540 cm ² /(V · s)	

та усиления на 6 dB. С учетом того, что конструкция транзистора в [9] была рассчитана на сантиметровый диапазон длин волн, длина его затвора была измерена с некоторой погрешностью, а также того, что новая гетероструктура имеет очень высокую проводимость, от разрабатываемого на основе новой гетероструктуры прибора на частоте 40 GHz по предварительным оценкам ожидалось получить коэффициент усиления 11–13 dB. Однако СВЧ-измерения показали существенно превышающие эти оценки результаты.

На рис. 1 приведены зависимости максимально стабильного коэффициента усиления транзистора (MSG), рассчитанного по измеренным *S*-параметрам, от расстояния затвор–сток, а на рис. 2 — от напряжения на затворе при различных расстояниях затвор–сток в конфигурации „транзистор с четырьмя одиночными секциями затвора“. Видно, что на частоте 40 GHz в широком диапазоне напряжений на затворе для транзисторов с шириной единичного пальца 50 μm коэффициент усиления заметно превосходит величину 15 dB и достигает в максимуме почти 18 dB, а максимальная величина усиления при других ширинах затворного пальца превосходит 20 dB. При этом максимальная частота генерации для расстояний затвор–сток, соответствующих наибольшей равномерности коэффициента усиления, составляет около 250 GHz при максимальной частоте усиления по току около 45 GHz (рис. 3). Как отмечалось ранее, при

длинах затвора 20–35 nm [1–5] приборы на основе GaN и на InP-подложках с узкозонным каналом демонстрируют гораздо более впечатляющие характеристики, однако перспективность тех или других типов структур следует оценивать при близких длинах затворов, так как простые аппроксимации могут приводить к значительным погрешностям. В свою очередь при близких длинах затворов DA-DpHEMT по коэффициенту усиления и предельным частотам находится на уровне транзисторов на InP-подложках с узкозонным каналом и существенно превосходит GaN-приборы, уступая последним в удель-

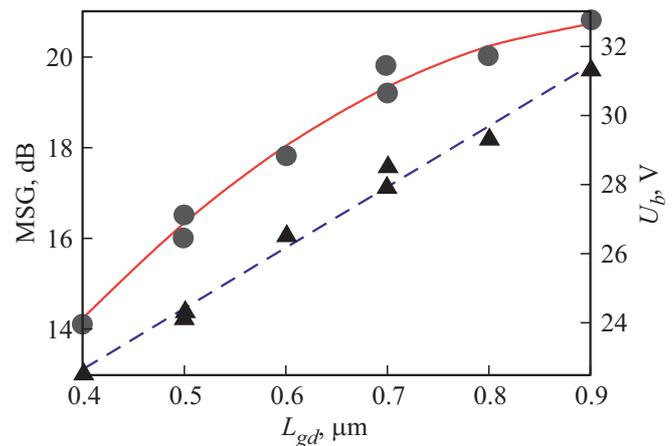


Рис. 1. Зависимость от расстояния затвор–сток максимально стабильного коэффициента усиления (MSG) (кружки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация на частоте 40 GHz) и пробивного напряжения транзистора U_b (треугольники — эксперимент, штриховая линия — аппроксимация). Напряжение исток–сток 4 V. Ширина затвора не фиксирована, для заданного расстояния затвор–сток выбирался лучший результат.

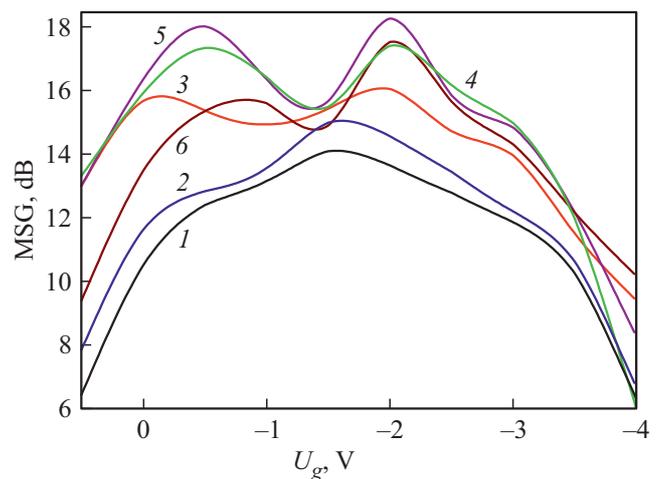


Рис. 2. Зависимость максимально стабильного коэффициента усиления (MSG) на частоте 40 GHz от напряжения на затворе транзистора. Напряжение исток–сток 4 V. Ширина затвора 200 μm, ширина единичного пальца затвора 50 μm. Расстояние затвор–сток, μm: 1 — 0.4, 2 — 0.5, 3 — 0.6, 4 — 0.7, 5 — 0.8, 6 — 0.9.

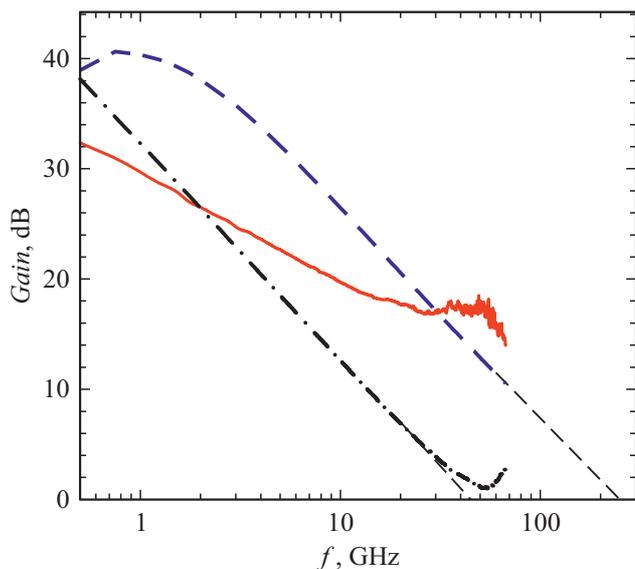


Рис. 3. Зависимости коэффициентов усиления транзистора от частоты. Штрихпунктирная линия — $|h_{21}|^2$, сплошная — MSG, штриховая — Unilateral gain (нелинейная модель, расчет). Напряжение исток–сток 4 В. Ширина затвора 200 μm , ширина единичного пальца затвора 50 μm . Расстояние затвор–сток 0.7 μm .

ной мощности. Таким образом, с учетом максимальных величин плотности тока стока и пробивных напряжений затвор–сток полученные результаты позволяют говорить о DA-DrHEMT как об одном из лучших арсенид-галлиевых приборов в миллиметровом диапазоне длин волн при данной норме размерной обработки (длине затвора).

Использованная гетероструктура $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}-\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}-\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ с донорно-акцепторным легированием хотя и демонстрирует очень высокие характеристики по слабополевой проводимости, но, возможно, является далеко не самой оптимальной. Близкую, а возможно, и несколько бóльшую удельную плотность тока при примерно таких же пробивных напряжениях, но заметно большем коэффициенте усиления [10,12] можно получить на исследованных в [13] гетероструктурах $\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}-\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{In}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{As}$, имеющих такую же ширину запрещенной зоны в слое канала. Кроме того, согласно проведенным в [12] оценкам, продвинуться по частотному диапазону в терагерцевую область можно, используя гетероструктуры $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}-\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}-\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с двусторонним относительно слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ -канала донорно-акцепторным легированием, однако за это придется расплачиваться падением пробивного напряжения из-за меньшей ширины запрещенной зоны $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ -канала.

Полученные результаты еще раз свидетельствуют о том, что донорно-акцепторное легирование является крайне эффективным способом улучшения транзисторных гетероструктур, а полевые транзисторы на таких структурах по ряду параметров могут составить достой-

ную конкуренцию приборам на основе нитрида галлия, особенно в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Wang, F. Wang, S. Li, T.Y. Huang, A.S. Ahmed, N.S. Mannem, J. Lee, E. Garay, D. Munzer, C. Snyder, S. Lee, H.T. Nguyen, M.E.D. Smith, *Power amplifiers performance survey 2000-present* [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html
- [2] B. Romanczyk, S.Wienecke, M. Guidry, H. Li, E. Ahmadi, X. Zheng, S. Keller, U.K. Mishra, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **65** (1), 45 (2018). DOI: 10.1109/TED.2017.2770087
- [3] Y. Tang, K. Shinohara, D. Regan, A. Corrion, D. Brown, J. Wong, A. Schmitz, H. Fung, S. Kim, M. Micovic, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **36** (6), 549 (2015). DOI: 10.1109/LED.2015.2421311
- [4] V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello, D.P. Nguyen, H. Wang, A. Pham, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **68** (7), 199 (2020). DOI: 10.1109/TMTT.2020.2989792
- [5] X. Mei, W. Yoshida, M. Lange, J. Lee, J. Zhou, P. Liu, K. Leong, A. Zamora, J. Padilla, S. Sarkozy, R. Lai, W.R. Deal, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **36** (4), 327 (2015). DOI: 10.1109/LED.2015.2407193
- [6] B.E. Foutz, S.K. O'Leary, M.S. Shur, L.F. Eastman, *J. Appl. Phys.*, **85** (11), 7727 (1999). DOI: 10.1063/1.370577
- [7] А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, Я.Б. Мартынов, В.Г. Лапин, А.А. Капралова, И.А. Анисимов, *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, № 4 (523), 5 (2014).
- [8] В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, А.Б. Соколов, *Письма в ЖТФ*, **38** (17), 84 (2012).
- [9] А.А. Борисов, К.С. Журавлев, С.С. Зырин, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.А. Маковецкая, В.И. Новоселец, А.Б. Пашковский, А.И. Торопов, Н.Д. Урсуляк, С.В. Щербаков, *Письма в ЖТФ*, **42** (16), 41 (2016).
- [10] А.Б. Пашковский, С.И. Новиков, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, Я.Б. Мартынов, *Письма в ЖТФ*, **44** (17) 103 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.17.46577.17372
- [11] Д.Ю. Протасов, Д.В. Гуляев, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, Е.В. Ерофеев, К.С. Журавлев, *Письма в ЖТФ*, **44** (6), 77 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.06.45770.17098
- [12] А.Б. Пашковский, А.С. Богданов, В.М. Лукашин, С.И. Новиков, *Микроэлектроника*, **49** (3), 210 (2020). DOI: 10.31857/S0544126920030059
- [13] И.С. Василевский, А.Н. Виниченко, Н.И. Каргин, В сб. *Мокеровские чтения. 8-я Междунар. науч.-практ. конф. по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники* (НИЯУ МИФИ, М., 2017), с. 28.