

Влияние технологии двойного травления под затвор на параметры НЕМТ транзисторов на подложках GaAs и InP

© В.А. Беляков¹, И.В. Макарец^{1,2}, А.Г. Фефелов¹, С.В. Оболенский^{1,2}, А.П. Васильев³,
А.Г. Кузьменков³, М.М. Кулагина⁴, Н.А. Малеев⁴

¹ Акционерное общество Научно-производственное предприятие „Салют“,
603950 Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603022 Нижний Новгород, Россия

³ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ilya0296@gmail.com; obolensk@rf.unn.ru

Поступила в Редакцию 12 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 19 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Разработаны транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs на подложке InP, обладающие удельной крутизной ~ 1000 мСм/мм, обратным напряжением пробоя > 10 В и предельной частотой усиления транзисторов по току 140 ГГц. Также были разработаны НЕМТ транзисторы на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs на подложке GaAs, выполненные по технологии двойной подзатворной канавки. Транзисторы демонстрируют максимальную измеренную удельную крутизну 520 мСм/мм и пробивное напряжение затвор-сток 14 В. Предельная частота усиления транзисторов по току 120 ГГц. Благодаря увеличенному пробивному напряжению разработанные транзисторы были использованы в монолитных интегральных схемах усилителей мощности миллиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью > 110 мВт.

Ключевые слова: транзистор, НЕМТ, GaAs, InP, двойная канавка.

DOI: 10.21883/FTP.2021.10.51439.38

1. Введение

Интегральные схемы на основе полевых транзисторов широко распространены в системах связи, радиолокации, в космической аппаратуре. В последние годы большие усилия направлены на развитие устройств, работающих в Ка диапазоне, например, передатчиков и приемников систем космической связи [1]. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе гетероструктур различного типа являются основными активными компонентами современной твердотельной СВЧ-электроники. В частности, на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs были созданы высокочастотные усилители большой мощности, способные работать в миллиметровом диапазоне [2]. Тем не менее проблема создания усилителя с выходной мощностью > 110 мВт в диапазоне частот 90–110 ГГц до сих пор остается актуальной. В связи с этим необходимо создать транзистор, имеющий удельную крутизну вольт-амперной характеристики (ВАХ) > 500 мСм/мм, удельный ток > 600 мА/мм, граничную частоту усиления по току > 110 ГГц.

НЕМТ на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs на подложках InP обладают рядом преимуществ перед теми, которые выполнены на подложке GaAs: более высокие рабочие частоты, минимальные шумы [2,3]. В [3] показано, что в случае уменьшения минимальной длины

затвора до десятков нанометров и увеличения мольной доли индия в InGaAs канальном слое гетероструктуры возможно создание усилителей в диапазоне > 200 ГГц и даже продвижение в ТГц-диапазон частот. Однако недостатком НЕМТ на основе InP является более низкий уровень рабочего напряжения сток-исток (3–4 В) и пробивного напряжения затвор-сток по сравнению с гетероструктурами на подложке GaAs [4], что ограничивает выходную мощность усилителей W-диапазона частот на уровне нескольких десятков мВт. Однако в работе [5] удалось получить пробивное напряжение затвор-сток ~ 10 В. В свою очередь НЕМТ транзисторы на основе GaAs обладают более высокими рабочими напряжениями сток-исток и пробивными напряжениями, но они недостаточно эффективны на высоких частотах. Применение технологии травления двойной канавки под затвор транзистора на GaAs НЕМТ (DR-НЕМТ GaAs — double-recessed-gate НЕМТ) позволяет улучшить частотную характеристику транзисторов и повысить плотность токов при сохранении и даже увеличении пробивного напряжения по сравнению с базовой технологией изготовления [5–9].

Цель данной работы — исследование влияния применения технологии двойного травления на характеристики НЕМТ транзисторов, выполненных на подложках GaAs и InP. Эффективность работы транзисторов про-

верялась на монолитной интегральной схеме усилителя мощности в диапазоне частот 90–110 ГГц с выходной мощностью > 110 мВт.

2. Объекты исследования

В работе были использованы приборные НЕМТ-гетероструктуры ES-228 и ES-344 с двухсторонним легированием канала (double НЕМТ), выращенные в АО НПП „Салют“ методом МОС-гидридной эпитаксии. Особенностями конструкции приборных double НЕМТ-гетероструктур является наличие дополнительного поставщика электронов в канал — высоколегированного слоя n^+ -AlGaAs, расположенного ниже канального слоя InGaAs, обеспечивающего поставку дополнительного количества электронов в проводящий канал [10], контактного слоя n^+ -GaAs для формирования омических контактов и технологического стоп-слоя AlAs, предназначенного для создания равномерного углубления подзатворной канавки методом селективного химического травления [10]. Концентрация и подвижность 2D газа в канале составляет $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $7000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Дизайн структуры показан в табл. 1.

Гетероструктура InAlAs/InGaAs (RC-1725) с двухсторонним легированием канала на подложке InP была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург [5]. Для используемой структуры типичные значения концентрации и подвижности 2D газа в канале составляют $(2.8\text{--}3.1) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $9500\text{--}10\,000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ соответственно. Дизайн структуры показан в табл. 2 [5].

В АО НПП „Салют“ были изготовлены три партии СВЧ полевых транзисторов с затвором длиной 100 нм и шириной 120 мкм: на структуре ES-228 травление проходило однократно, затвор расположен по центру

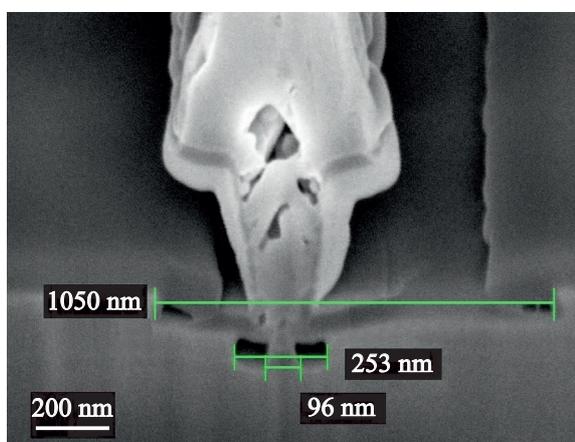


Рис. 1. Изображение поперечного среза затвора транзистора длиной 96 нм, полученное на растровом электронном микроскопе. Показана первая канавка длиной 1050 нм, вторая канавка длиной 253 нм.

Таблица 1. Параметры слоев транзисторной гетероструктуры НЕМТ GaAs

Наименование слоя эпитаксиальной структуры	Материал	Толщина слоя, нм
Контактный слой	n^+ -GaAs	50–60
Etch-stop слой	AlAs	2–3
Барьерный слой 1	GaAs	15–20
Барьерный слой 2	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	5–7
Легированный слой	n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	15–20
Спейсер	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	2–3
Сглаживающий слой	GaAs	1–3
Канальный слой	$\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	8–15
Сглаживающий слой	GaAs	1–3
Спейсер	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	2–3
Легированный слой	n^+ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	2–6
Буферный слой 1	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	100–150
Буферный слой 2	GaAs	200–300
Подложка	i -GaAs	

Таблица 2. Параметры слоев транзисторной гетероструктуры НЕМТ InP

Наименование слоя эпитаксиальной структуры	Материал	Толщина слоя, нм
Контактный	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	20
Etch-stop	InAlAs	3
Контактный	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	15
Барьерный	$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	21
Композитный канал		26
Буферный	$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	150
Подложка InP (100)		

между стоком и истоком (SR-НЕМТ GaAs), на структурах ES-344 и RC-1725 проводилось двойное травление, затвор смещен к истоку транзистора (DR-НЕМТ GaAs и DR-НЕМТ InP соответственно). На рис. 1 показано изображение в растровом электронном микроскопе поперечного среза затвора транзистора, выполненного на подложке ES-344. Для других подложек форма затвора и длина были аналогичными.

Грибообразная форма затвора с высокой ножкой применяется для уменьшения паразитных емкостей транзистора, прежде всего емкости затвор-сток. Широкая шляпа необходима для уменьшения сопротивления затвора.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Измерение статических параметров транзисторов

Во всех исследуемых партиях топология транзисторов имеет вид четырех параллельно включенных затворных секций длиной 30 мкм каждая (рис. 2). Истоки транзисторов соединены с помощью воздушного моста,

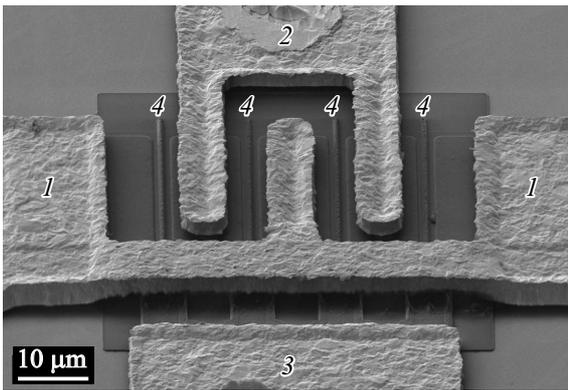


Рис. 2. Внешний вид транзистора с шириной затвора 120 мкм (4 пальца по 30 мкм): 1 — исток, 2 — сток, 3 — затворная шина, 4 — затворная секция.

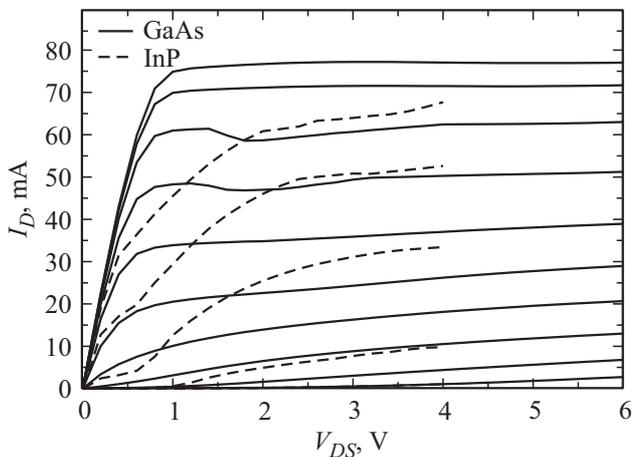


Рис. 3. Измеренные вольт-амперные характеристики DR-HEMT транзисторов, выполненные на подложках GaAs (сплошная линия снизу вверх) при изменении напряжения на затворе от -1.4 до 0.4 В с шагом 0.2 В и InP (штриховая линия снизу вверх) при изменении напряжения на затворе от -1 до -0.2 В с шагом 0.2 В.

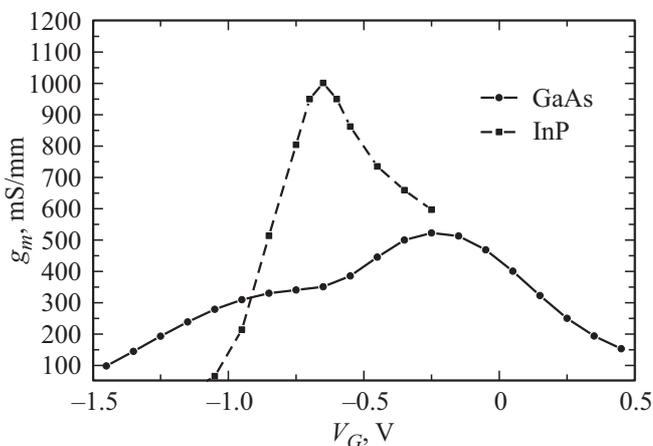


Рис. 4. Измеренные зависимости удельной крутизны изготовленных DR-HEMT на подложках различного типа от напряжения на затворе при напряжении на стоке 4 В.

Таблица 3. Параметры транзисторов на постоянном токе

Структура, тип транзистора	V_{th} , В	V_{br} , В	g_m , мСм/мм ($V_{DS} = 4$ В)	$I_{D sat}$, мА/мм	$V_{DS max}$, В
ES-228 SR-HEMT GaAs	1.4	13	400	450	5–6
ES-344 DR-HEMT GaAs	1.3	14	520	670	7–8
RC-1725 DR-HEMT InP	1.2	12	1000	600	3–4

который увеличивает емкости затвор-исток и затвор-сток на 2 фФ.

Результаты измерений статических характеристик исследуемых транзисторов показаны на рис. 3. Наличие области отрицательного дифференциального сопротивления связано с междолинным рассеянием электронов в транзисторах с узким затвором. Двойная канавка увеличивает ток стока транзистора, что связано с увеличением скорости электронов в канале.

В табл. 3 представлены типичные значения напряжения отсечки (V_{th}), напряжения пробоя затвора (V_{br}) по уровню 1 мА/мм, максимального рабочего напряжения сток-исток при максимальной крутизне ($V_{DS max}$), удельной максимальной крутизны (g_m) и удельного тока насыщения стока ($I_{D sat}$) SR-HEMT транзисторов (ES-228) и DR-HEMT транзисторов (ES-344) на подложках GaAs и для DR-HEMT транзисторов (RC-1725) на подложке InP.

Из таблицы следует, что транзисторы, выполненные по технологии двойного травления на подложке GaAs (ES-344), показали значительно лучшие параметры: крутизну ВАХ на 30% больше, а удельный ток насыщения на 50% больше, чем выполненные по технологии однократного травления.

Зарубежные аналоги DR-HEMT транзисторов демонстрируют удельную крутизну 500 мСм/мм, удельный ток насыщения 680 мА/мм [6].

Транзисторы, выполненные по технологии двойного травления на структуре InP HEMT, показали в 2 раза большую крутизну (~ 1000 мСм/мм), чем транзисторы на структуре ES-344 GaAs HEMT, вследствие большей подвижности электронов в канале и меньшего напряжения отсечки (см. рис. 4). Стоит отметить, что несмотря на большое пробивное напряжение затвор-исток (12 В), транзисторы на структуре InP имели рабочее напряжение на стоке не более 4 В.

3.2. Измерение СВЧ параметров транзисторов

Малосигнальные высокочастотные S-параметры транзисторов были измерены с помощью векторного анализатора цепей в W диапазоне (75–110 ГГц). На рис. 5 показаны результаты измерений максимального стабильного усиления G_{max} изготовленных транзисторов, а

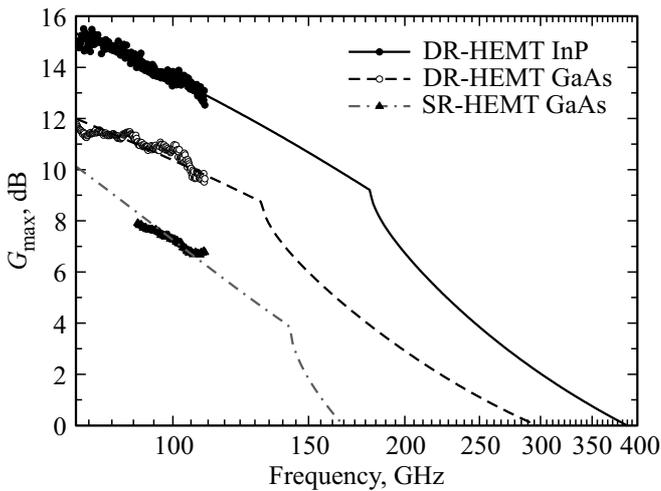


Рис. 5. Зависимости максимального стабильного усиления G_{\max} от частоты для DR-HEMT InP, DR-HEMT GaAs и SR-HEMT GaAs. Точками показаны результаты измерений, линиями — результат моделирования.

также результаты моделирования S-параметров транзисторов (на рисунке показано сплошными линиями). Моделирование проводилось на основе малосигнальной эквивалентной схемы Поспешальского [11,12]. При этом предварительно учитывались внешние элементы цепи, необходимые для измерения параметров транзистора [13].

В табл. 4 приведены сводные параметры транзисторов: граничная частота f_t , предельная частота генерации f_{\max} , максимальное стабильное усиление G_{\max} на частоте 100 ГГц.

Исследованные транзисторы DR-HEMT на подложке GaAs демонстрируют высокие СВЧ-характеристики в миллиметровом диапазоне. В частности, G_{\max} на частоте 100 ГГц больше 10 дБ, граничная частота f_t составляет 120 ГГц (у SR-HEMT 108 ГГц). Таким образом, применение технологии двойного травления открывает перспективы использования рНЕМТ транзисторов на подложке GaAs для создания мощных усилителей в миллиметровом диапазоне.

Исходя из СВЧ измерений InP НЕМТ транзистора на частотах W диапазона, емкость обратной связи InP

Таблица 4. СВЧ параметры исследуемых транзисторов

Структура, тип транзистора	f_t , ГГц	f_{\max} , ГГц	G_{\max} , дБ ($f = 100$ ГГц)
ES-228 SR-HEMT GaAs	108	167	7.3
ES-344 DR-HEMT GaAs	120	298	10.8
RC-1725 DR-HEMT InP	140	388	13.7

НЕМТ транзистора на 20% меньше (~ 9 фФ), чем у GaAs НЕМТ (11 фФ), выполненных по технологии двойного травления. Граничная частота транзистора 140 ГГц.

На основе технологии двойной канавки в АО НПП „Салют“ был изготовлен усилитель с коэффициентом усиления > 13 дБ и насыщенной мощностью 140 мВт в диапазоне 90–96 ГГц.

4. Заключение

Технология двойного травления канавки под затвор позволяет улучшить параметры транзисторов, выполненных на основе гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs на подложке GaAs. Полученные значения тока насыщения 670 мА/мм, максимальной удельной крутизны 520 мСм/мм, граничной частоты 120 ГГц и максимального стабильного усиления > 10 дБ позволяют применять транзистор при проектировании монолитных интегральных схем средней мощности W диапазона. При этом уровни пробивных напряжений затвора и максимального рабочего напряжения по стоку потенциально повышают надежность работы транзисторов при повышенных уровнях входного сигнала.

InP НЕМТ транзисторы предпочтительно использовать для создания малошумящих интегральных схем W диапазона частот благодаря сочетанию большей крутизны и меньшей емкости обратной связи в сравнении с GaAs НЕМТ. Для усилителей большой мощности данные транзисторы не подходят вследствие малого рабочего напряжения (3–4 В).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.S. Hong, M.J. Lancaster. IEEE Trans. Microwave Theory Techniques, **46** (1), 118 (1998).
- [2] S.-J. Cho, C. Wang, R.K. Maharjan, N.-Y. Kim. *Proceedings of APMC 2012* (Kaohsiung, Taiwan, 2012) p. 4.
- [3] X.B. Mei, W. Yoshida, Z. Zhou, M. Lange, J. Lee, P.H. Liu, K. Leong, R. Lai, W.R. Deal. *Extended Abstracts of the 2015 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials* (Sapporo, Japan, 2015) p. 1034.
- [4] S. Hoshi, H. Moriguchi, M. Itoh, T. Ohshima, M. Tsunotani, T. Ichioka. Jpn. J. Appl. Phys., **42**, 2367 (2003).
- [5] Н.А. Малеев, А.П. Васильев, А.Г. Кузьменков, М.А. Бобров, М.М. Кулагина, С.И. Трошков, С.Н. Малеев, В.А. Беляков, Е.В. Петряков, Ю.П. Кудряшов, Е.Л. Фефелова, И.В. Макаревич, С.А. Блохин, Ф.А. Ахмедов, А.В. Егоров, А.В. Егоров, А.Г. Фефелов, В.М. Устинов. *Письма ЖТФ*, **45** (21), 29 (2019).
- [6] S.-J. Cho, C. Wang, N.-Y. Kim. *Microelectron. Eng.*, **113**, 11 (2014).

- [7] Y.C. Chen, R. Lai, H. Wang, H.C. Yen, D. Streit, R.M. Dia, W. Jones, T. Block, P.H. Liu, T-W. Huang, Y.C. Chou, K. Stamper. *Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials*. IEEE, 509 (1997).
- [8] Y. Zhong, X. Wang, Y. Su, Y. Cao, J. Zhi, Y. Zhang, X. Liu. *J. Semicond.*, **33**, 054007 (2012).
- [9] L.F. Lester, P.M. Smith, P. Ho, P.C. Chao, R.C. Tiberio, K.H.G. Duh, E.D. Wolf. *IEEE Technical Digest, Int. Electron Dev. Meeting* (San Francisco, CA, USA, 1988) p. 172.
- [10] J.B. Boos, W. Kruppa. *Electron. Lett.*, **27**, 1909 (1991).
- [11] M.W. Pospieszalski. *IEEE Trans. Microwave Theory Techniques*, **37**, 1340 (1989).
- [12] G. Crupi, D. Schreurs. Academic Press, 467 (2014).
- [13] M. Koolen, J. Geelen, M. Versleijen. *IEEE Bipolar Circuits Technology Meeting*, 189 (1991).

Редактор Г.А. Оганесян

Effect of double recess technology on the parameters of HEMT transistors on GaAs and InP substrates

V.A. Belyakov¹, I.V. Makartsev^{1,2}, A.G. Fefelov¹, S.V. Obolensky^{1,2}, A.P. Vasilyev³, A.G. Kyzmenkov³, M.M. Kulagina⁴, N.A. Maleev⁴

¹ JSC SPE „Salyut“,

603950 Nizhny Novgorod, Russia

² Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,

603022 Nizhny Novgorod, Russia

³ Submicron Heterostructures for Microelectronics,

Research & Engineering Center,

Russian Academy of Sciences,

194021 St. Petersburg, Russia

⁴ Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

Abstract High electron mobility transistors (HEMTs) have been developed based on InAlAs/InGaAs heterostructures on an InP substrate, with a transconductance of about 1000 mS/mm, a reverse breakdown voltage of more than 10 V and a unity-gain cut-off frequency is 140 GHz. In addition, HEMT transistors based on AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructures on a GaAs substrate with double gate recessing technology have been developed. This transistors demonstrate a maximum measured transconductance of the current-voltage characteristic of 520 mS/mm, a maximum drain current of 670 mA/mm, and a gate-drain breakdown voltage of 14 V and a unity-gain cut-off frequency is 120 GHz. Due to the increased breakdown voltage, the developed transistors have been used in monolithic integrated circuits of millimeter-wave power amplifiers with an output power of more than 110 mW.