

07

InAlAs/InGaAs/InP HEMTs с композитным каналом и улучшенными пробивными характеристиками

© Н.А. Малеев^{1,2}, А.П. Васильев³, А.Г. Кузьменков³, М.А. Бобров¹, М.М. Кулагина¹, С.И. Трошков¹, С.Н. Малеев¹, В.А. Беляков⁴, Е.В. Петрякова⁴, Ю.П. Кудряшова⁴, Е.Л. Фелелова⁴, И.В. Макарецев⁴, С.А. Блохин¹, Ф.А. Ахмедов⁵, А.В. Егоров⁵, А.Г. Фелелов⁴, В.М. Устинов¹⁻³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

³ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴ НПП „Салют“, Нижний Новгород, Россия

⁵ НПО „Техномаш“, Москва, Россия

E-mail: maleev@beam.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 июля 2019 г.

В окончательной редакции 3 июля 2019 г.

Принято к публикации 11 июля 2019 г.

Разработаны транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs/InP, обладающие улучшенными пробивными характеристиками. В приборах используется структура композитного канала InGaAs в сочетании с полностью селективным процессом формирования двойной подзатворной канавки. HEMT с длиной T -образного затвора 120 nm, состоящего из четырех пальцев шириной по 30 μm , демонстрируют максимальную измеренную удельную крутизну вольт-амперной характеристики 810 mS/mm, максимальную плотность тока стока 460 mA/mm и пробивное напряжение затвор–сток 8–10 V. Предельная частота усиления транзисторов по току превышает 115 GHz. Благодаря увеличенному пробивному напряжению и технологии формирования двойной затворной канавки методом селективного травления разработанные транзисторы перспективны для использования в монолитных интегральных схемах усилителей средней мощности миллиметрового диапазона.

Ключевые слова: транзистор, HEMT, InP, пробивное напряжение, миллиметровый диапазон.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.21.48470.17961

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур различного типа являются основными активными компонентами современной твердотельной СВЧ-электроники. HEMT на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs, выращенных на подложках InP, обладают наивысшими рабочими частотами [1] и минимальными шумами [2]. Снижение минимальной длины T -образного затворного электрода до уровня десятков нанометров и увеличение мольной доли In в канале транзисторной гетероструктуры делают реальной перспективу продвижения в THz-диапазон [3]. Использование усилителей мощности на основе InP HEMT в сочетании с эффективными диодными умножителями в перспективе позволяет реализовать твердотельные источники THz-диапазона. Однако серьезной проблемой для InP HEMT является существенно более низкий уровень пробивного напряжения затвор–сток по сравнению с таковым для AlGaAs/InGaAs HEMT на подложках GaAs [4] и тем более HEMT на GaN.

Низкий уровень пробивных напряжений InP HEMT ограничивает возможности создания монолитных интегральных схем (МИС) усилителей мощности миллиметрового диапазона на их основе, однако в отдельных публикациях сообщается об успешном создании таких устройств с уровнем выходной мощности сотни mW [5,6]. Анализ опубликованных результатов

разработок МИС усилителей мощности на InP HEMT показывает, что характеристики приборов критически зависят не только от конструкции гетероструктуры и длины затворного электрода, но и от ширины и глубины травления подзатворной канавки [7,8], а для определения оптимальных параметров конструкции необходима тщательная экспериментальная отработка.

В настоящей работе представлены результаты разработки HEMT на основе гетероструктуры InAlAs/InGaAs/InP с композитным каналом, изготавливаемых с использованием селективного травления двойной подзатворной канавки и обладающих улучшенными пробивными характеристиками.

В базовой конструкции InP HEMT обычно используется гетероструктура $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (легированный контактный слой)/ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (нелегированный барьерный и легированный донорный слой)/ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (нелегированный канал)/ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (нелегированный буферный слой), согласованная по постоянной кристаллической решетки с подложкой InP. В структурах, предназначенных для создания усилителей мощности, прилегающая к каналу тонкая часть буферного слоя также может легироваться с целью увеличения концентрации носителей в канале [9]. Для улучшения транспортных свойств используют гетероструктуры с повышенным содержанием In в канале, однако увеличение мольной

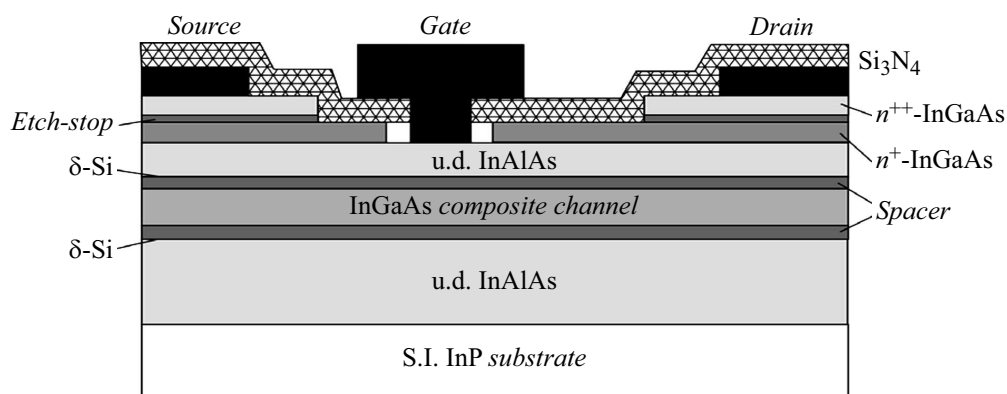


Рис. 1. Схематическое поперечное сечение конструкции InP HEMT с композитным каналом и стоп-слоем InAlAs для формирования двойной затворной канавки методом селективного травления.

доли In в целом ведет к снижению пробивных напряжений из-за усиления эффектов ударной ионизации, а возникающие механические напряжения создают риск формирования дислокаций при превышении критической толщины псевдоморфного роста или отклонении режима эпитаксиального выращивания от оптимальных условий [10]. Одно из направлений улучшения пробивных характеристик InP HEMT связано с использованием гетероструктур, в которых состав слоя канала меняется таким образом, чтобы подавить эффекты ионизации, сильнее проявляющиеся для структур с высоким содержанием In. В рамках данного подхода были предложены так называемые гетероструктуры с композитным каналом, в которых используется канал, состоящий из набора слоев InGaAs с низким и высоким содержанием In [11], слоя InGaAs и слоя InP [12] либо слоя InGaAs и нижнего слоя InAsP [13]. Другим направлением является увеличение пробивного напряжения подзатворного слоя, для чего рассматриваются варианты использования барьерного слоя InAlAs с повышенным содержанием Al [14]. Как и в случае структур AlGaAs/InGaAs HEMT, для улучшения пробивных характеристик InP HEMT используются структуры с двойной подзатворной канавкой. При этом важно обеспечить высокую точность как по глубине травления, так и по длине канавок и расположению затворного электрода. В работе [15] предложена конструкция, обеспечивающая использование селективного травления при формировании первой и второй подзатворной канавки, что обеспечивает потенциальную стабильность и воспроизводимость результатов. Некоторым недостатком является использование тонкого стоп-слоя AlAs, поскольку данный материал склонен к быстрому окислению при экспонировании на атмосферу.

Конструкция InP HEMT, используемая в настоящей работе, включает композитный канал InGaAs и двойную подзатворную канавку, формируемую селективным травлением. Для увеличения концентрации носителей в канале использовано двустороннее асимметричное легирование. В качестве стоп-слоя используется InAlAs с высоким содержанием Al, который относительно устой-

чив к окислению по сравнению с чистым AlAs. Схематическое поперечное сечение конструкции транзистора приведено на рис. 1. При проектировании транзисторной гетероструктуры использовалось самосогласованное численное решение 1D-уравнений Шредингера и Пуассона для различных сечений транзисторной структуры. При этом исследовалась эффективность управления зарядом канала в подзатворной области и рассчитывалась величина полного заряда канала в области между стоковым краем затвора и краем первой затворной канавки. Как известно, величина этого заряда критически влияет на величину пробивного напряжения затвор–сток [4]. Моделирование статических характеристик транзистора проводилось в рамках 2D-модели, аналогичной разработанной ранее для моделирования характеристик AlGaAs/InGaAs/GaAs [16]. При малых напряжениях на затворе и стоке электроны преимущественно локализованы в области канала с высоким содержанием In, что обеспечивает их высокую подвижность. При больших напряжениях на затворе и стоке, что соответствует условиям для области вблизи стокового края затвора, электроны в существенной степени перераспределяются в область канала с пониженным содержанием In, для них эффект ударной ионизации снижен. С целью обеспечения эффективного управления в приборах с короткими затворами используются малая толщина барьерного слоя и относительно тонкий слой канала. Для формирования двойной подзатворной канавки используется конструкция контактного слоя InGaAs, состоящего из двух частей: верхнего сильно легированного слоя n^{++} -InGaAs и нижнего относительно слабо легированного слоя n^{+} -InGaAs, между которыми располагается тонкий стоп-слой InAlAs с высоким содержанием Al. После селективного травления первой подзатворной канавки стоп-слой удаляется, а вторая подзатворная канавка формируется травлением нижнего слоя InGaAs до барьерного слоя InAlAs. Основные параметры слоев для итоговой конструкции транзисторной гетероструктуры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры слоев транзисторной гетероструктуры

| Слой | Материал | Легирование | Толщина, nm |
|--|--|---|-------------|
| Контактный слой | In _{0.53} Ga _{0.47} As | Si: 10 ¹⁹ cm ⁻³ | 20 |
| Стоп-слой | InAlAs | Нелегированный | 3 |
| Контактный слой | In _{0.53} Ga _{0.47} As | Si: 10 ¹⁷ cm ⁻³ | 15 |
| Барьерный слой | In _{0.52} Al _{0.48} As | Нелегированный | 21 |
| Донорный слой δ-Si | — | Si: 3 · 10 ¹² cm ⁻² | — |
| Разделительный слой (спейсер) | In _{0.52} Al _{0.48} As | Нелегированный | 4 |
| Канал (часть 1) | In _{0.65} Ga _{0.35} As | » | 12 |
| Канал (часть 2) | In _{0.35} Ga _{0.65} As | » | 8 |
| Разделительный слой (спейсер) | In _{0.52} Al _{0.48} As | » | 4 |
| Донорный слой δ-Si | — | Si: 1 · 10 ¹² cm ⁻² | — |
| Буферный слой | In _{0.52} Al _{0.48} As | Нелегированный | 150 |
| Подложка InP (100), полуизолирующая | | | |

Таблица 2. Статические характеристики изготовленного транзистора с четырьмя включенными параллельно затворными секциями длиной по 30 μm каждая

| Наименование характеристики | Измеренное значение |
|-----------------------------|--|
| Ток насыщения сток–исток | $I_{Dsat}(V_G = +0.2 \text{ V}, V_{DS} = 4 \text{ V}) = 55 \text{ mA}$ (460 mA/mm) |
| Напряжение отсечки | $U_{th} = 0.9 \text{ V}$ |
| Максимальная крутизна | $g = 97 \text{ mS}$ (810 mS/mm) |
| Барьерное напряжение | $V_{bar} = 0.8 \text{ V}$ |
| Напряжение обратного пробоя | $V_{br} = 10 \text{ V}$ |

Гетероструктуры InP НЕМТ предложенной конструкции выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках полуизолирующего InP. По результатам холловских измерений типичные значения слоевой концентрации и подвижностей носителей для калибровочных гетероструктур после оптимизации уровня легирования донорных слоев при комнатной температуре составляют $(2.8–3.1) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ и $9500–10\,000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ соответственно. Измерения при температуре жидкого азота дают значения слоевой концентрации около $2.8 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ и подвижностей носителей около $41\,000–42\,000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Результаты измерений подтверждают хорошие транспортные свойства канала, несмотря на его относительно малую толщину, переменный состав по содержанию In и двустороннее легирование.

Процесс изготовления тестовых InP НЕМТ включал формирование омических контактов истока, стока и меток совмещения методом „взрывной“ литографии с использованием контактной металлизации AuGe/Ni/Au и последующей высокотемпературной обработкой, травление изолирующей меза-структуры, формирование первой подзатворной канавки с использованием электронно-лучевой литографии (ЭЛГ) и селективного травления (в травителе на основе $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}$), плазмохимическое осаждение слоя Si_3N_4 , формирование в диэлектрике затворной щели шириной 120 nm с

помощью формирования методом ЭЛГ рисунка в слое электронного резиста и последующего плазмохимического травления слоя Si_3N_4 , формирование топологии „шляпки“ T-образного затвора в слое электронного резиста методом ЭЛГ, селективное травление второй подзатворной канавки через вскрытое в электронном резисте окно и затворной щели в диэлектрике с последующим напылением затворной металлизации и формированием затворного электрода методом „взрывной“ литографии. Затем проводилась пассивация поверхности диэлектриком, вскрытие в диэлектрике окон к контактными площадкам истока, стока и затвора, после чего формировалась металлизация контактных площадок для проведения измерений статических и высокочастотных характеристик транзисторов на пластине.

На рис. 2 приведены измеренные вольт-амперные характеристики, а в табл. 2 представлены основные параметры, определенные с помощью измерения статических характеристик для одного из изготовленных транзисторов с шириной затворной щели в диэлектрике 120 nm, имеющего топологию в виде четырех включенных параллельно затворных секций длиной по 30 μm каждая. При напряжении сток–исток 4 V прибор демонстрирует максимальное значение удельной крутизны вольт-амперной характеристики 810 mS/mm для напряжения на затворе около -0.5 V . Максимальная измеренная плотность тока стока около 460 mA/mm. Изме-

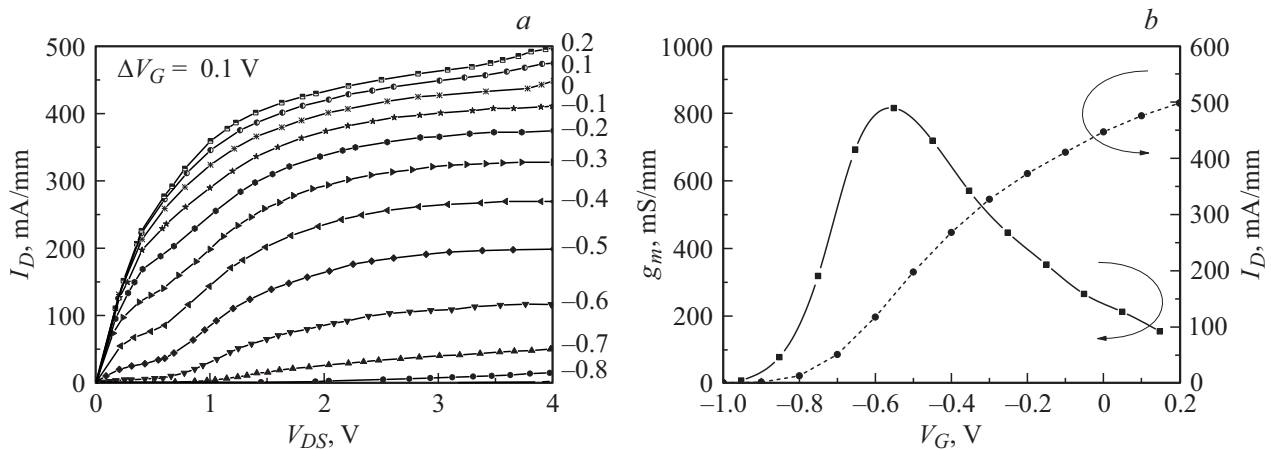


Рис. 2. Измеренные характеристики изготовленного тестового транзистора с длиной затвора 120 нм и полной шириной затвора 120 мкм. *a* — вольт-амперные характеристики сток–исток при наборе напряжений на затворе, *b* — зависимости удельной крутизны (квадраты) и плотности тока стока (кружки) от напряжения на затворе.

ренные значения пробивного напряжения сток–затвор (по уровню 1 мА/мм) для изготовленных транзисторов составляют от 8 до 10 В, что соответствует лучшим значениям, опубликованным для InP HEMT с аналогичной максимальной плотностью тока стока [4]. Более высокие значения пробивных напряжений (до 15 В) были опубликованы только для InP HEMT с односторонним легированием канала при невысоких значениях максимальной плотности тока [17], что ограничивает возможность реализации усилителей мощности на таких приборах. Вольт-амперные характеристики изготовленных транзисторов имеют четко выраженное насыщение при больших стоковых напряжениях без сильных проявлений короткоканальных эффектов (рис. 2), что свидетельствует о хорошей локализации носителей в канале при сильных полях. Применение селективного травления при формировании первой (расширенной) и второй подзатворной канавки с использованием стоп-слоев InAlAs обеспечивает высокую стабильность и воспроизводимость результатов, необходимую в технологии МИС.

Для изготовленных тестовых транзисторов были выполнены измерения малосигнальных S -параметров непосредственно на пластине при различных частотах с помощью векторного анализатора PNA-X (N5245A). Затем рассчитывались частотные зависимости H_{21} и путем их стандартных экстраполяций прямыми с наклоном 20 dB/dec находились значения предельной частоты усиления транзисторов по току F_T . Построение эквивалентных схем для транзисторов с различной полной шириной затвора позволило получить значения элементов эквивалентной схемы, используя которую можно построить расчетные частотные зависимости S -параметров и H -параметров для „внутреннего“ транзистора (активной части прибора без паразитных элементов, связанных с емкостями, сопротивлениями и индуктивностями электродов для подвода СВЧ-сигнала). На рис. 3 приведены примеры частотных зависимостей H_{21} и S_{21} , из анализа которых следует, что величина предельной частоты усиления транзистора по току превышает 115 GHz.

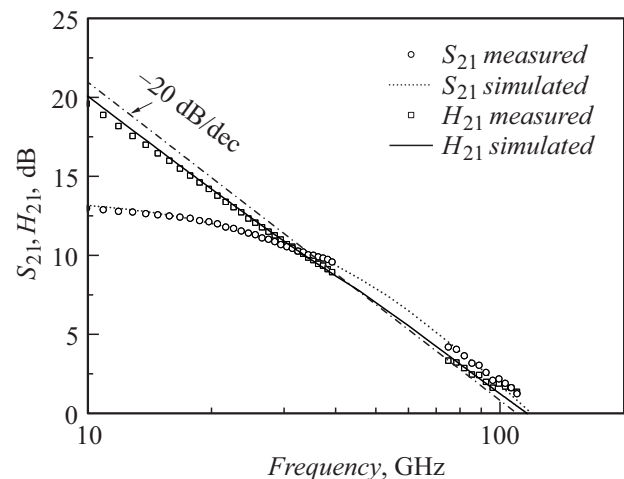


Рис. 3. Частотные зависимости параметров S_{21} и H_{21} для изготовленного тестового транзистора с длиной затвора 120 нм и шириной затвора $4 \times 30 \mu\text{m}$ (напряжение сток–исток 4 В, напряжение на затворе -0.3 V), измеренные и рассчитанные по восстановленным параметрам эквивалентной схемы.

Разработанные HEMT на основе гетероструктур InAlAs/InGaAs/InP с композитным каналом обладают хорошими пробивными характеристиками при высоких значениях крутизны и достаточно высоких максимальных уровнях тока стока. Использование селективной технологии формирования двойной затворной канавки и высокие частотные характеристики делают их перспективными для использования в МИС усилителей средней мощности миллиметрового диапазона.

Финансирование работы

Н.А. Малеев, М.А. Бобров, М.М. Кулагина, С.А. Блохин, В.М. Устинов выражают благодарность за поддержку в рамках Программы Президиума РАН № 5

„Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов“ при выполнении работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Kim D.H., Brar B., del Alamo J.A. // 2011 Int. Electron Devices Meeting. IEEE, 2011. P. 13.6.1–13.6.4.
- [2] Schlee J. Cryogenic ultra-low noise InP high electron mobility transistors. PhD Thesis. Chalmers University of Technology, 2013. 58 p.
- [3] Mei X.B., Yoshida W., Zhou Z., Lange M., Lee J., Liu P.H., Leong K., Lai R., Deal W.R. // Extended Abstracts of the 2015 Int. Conf. on solid state devices and materials. Sapporo, Japan, 2015. M-1-3. P. 1034–1035.
- [4] del Alamo J.A., Somerville M.H. // IEEE J. Solid-State Circuits. 1999. V. 34. P. 1204–1211.
- [5] Kong W.M.T., Wang S.C., Chao P.-C., Tu D.-W., Hwang K., Tang O.S.A., Liu S.-M., Ho P., Nichols K., Heaton J. // IEEE Electron. Dev. Lett. 2000. V. 21. P. 521–523.
- [6] Radisic V., Leong K.M.K.H., Sarkozy S., Mei X., Yoshida W., Liu P.-H., Deal W.R., Lai R. // IEEE J. Solid-State Circuits. 2012. V. 47. P. 2291–2297.
- [7] Chen Y.C., Lai R., Wang H., Yen H.C., Streit D., Dia R.M., Jones W., Block T., Liu P.H., Huang T.-W., Chou Y.C., Stamper K. // Int. Conf. on indium phosphide and related materials. IEEE, 1997. P. 509–512.
- [8] Zhong Y., Wang X., Su Y., Cao Y., Zhi J., Zhang Y., Liu X. // J. Semicond. 2012. V. 33. P. 054007.
- [9] Boos J.B., Kruppa W. // Electron. Lett. 1991. V. 27. P. 1909–1910.
- [10] Aadit M.N.A., Kirtania S.G., Afrin F., Alam Md.K., Khosru Q.D.M. High electron mobility transistors // Different types of field-effect transistors. Theory and applications / Ed. M. Pejović. InTech Open, 2017. P. 45–64. <http://dx.doi.org/10.5772/67796>
- [11] Chertouk M., Heiss H., Xu D., Kraus S., Klein W., Bohm G., Trankle G., Weimann G. // IEEE Electron Dev. Lett. 1996. V. 17. P. 273–275.
- [12] Enoki T., Arai K., Kohzen A., Ishii Y. // Proc. of Int. Conf. on indium phosphide and related material. IEEE, 1992. P. 14–17.
- [13] Ouchi K., Mishima T., Kudo M., Ohta O. // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. V. 41. P. 1004–1007.
- [14] Boudrissa M., Delos E., Wallaert X., Theron D., Jaeger J. // IEEE Electron Device Lett. 2001. V. 22. P. 257–259.
- [15] Wang S.C., Liu J.S., Hwang K.C., Kong W., Tu D.W., Ho P., Mohnkern L., Nichols K., Chao P.C. // IEEE Electron. Dev. Lett. 2000. V. 21. P. 335–337.
- [16] Тихомиров В.Г., Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Соловьев Ю.В., Гладышев А.Г., Кулагина М.М., Земляков В.Е., Дудинов К.В., Янкевич В.Б., Бобыль А.В., Устинов В.М. // ФТП. 2011. Т. 45. В. 10. С. 1405–1409.
- [17] Bouloukou A., Sobih A., Kettle D., Sly J., Missous M. // Proc. of the 4th ESA Workshop on millimetre wave technology and applications. Espoo, Finland, 2006. P. 221–226.