

УДК 621.315.592

XXIII Международный симпозиум „Нанопизика и наноэлектроника“,
Нижний Новгород, 11–14 марта 2019 г.

Вертикальный полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом на основе GaAs

© Н.В. Востоков¹, В.М. Данильцев¹, С.А. Краев¹, В.Л. Крюков², Е.В. Скороходов¹,
С.С. Стрельченко², В.И. Шашкин¹

¹ Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

² ООО „МеГа Эпитех“,
248033 Калуга, Россия

E-mail: vostokov@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в Редакцию 24 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2019 г.

Принята к публикации 29 апреля 2019 г.

Приводятся первые результаты по созданию оригинального силового полевого транзистора на GaAs с вертикальным каналом, управляемым $p-n$ -переходом. Главной технологической особенностью является использование двух отдельных процессов эпитаксиального роста при формировании транзисторной структуры. Часть транзистора, содержащая области стока, дрейфа и затвора, выращивается методом жидкофазной эпитаксии. Для формирования областей канала и истока применяется технология металлоорганической газофазной эпитаксии.

Ключевые слова: силовой вертикальный полевой транзистор, GaAs.

DOI: 10.21883/FTP.2019.10.48282.22

1. Введение

Преобразователи мощных электрических сигналов на основе полупроводниковых элементов (диодов и транзисторов) используются в самых различных областях техники. Это направление электроники стремительно развивается благодаря успехам в совершенствовании технологии изготовления и значительному улучшению параметров силовых полупроводниковых приборов. В настоящее время параметры приборов силовой электроники на основе кремния почти достигли теоретических пределов. В последние годы ведутся исследования новых материалов для силовых приборов — более широкозонных арсенида галлия, карбида кремния, III-нитридов. Наиболее перспективными с точки зрения электрофизических характеристик представляются SiC и GaN. Тем не менее существует целый ряд физических и технологических проблем, которые необходимо решить в процессе создания приборов на основе этих полупроводников. Исследования в этом направлении интенсивно проводятся [1–5]. Перспективность GaAs связана, в частности, с его прямозонной структурой, малым временем жизни неосновных носителей заряда и высокой подвижностью электронов. Другим преимуществом GaAs является возможность формирования методом жидкофазной эпитаксии структур с толстой (> 100 мкм) высокоомной областью и высокого кристал-

лического качества [6]. Эти факторы обеспечивают высокие быстродействие и показатели надежности работы приборов при больших температурах, плотностях тока и напряжениях.

Настоящая работа направлена на создание нового силового полевого транзистора на основе GaAs.

2. Конструкция и изготовление транзисторов

В настоящее время разрабатывается большое количество различных типов и конструкций силовых транзисторов для широкого круга применений [7]. Существенной конструктивной особенностью транзистора является расположение канала протекания тока. Силовой транзистор с вертикальным каналом потенциально имеет ряд преимуществ по сравнению с горизонтальной структурой [3]: достижение высоких уровней тока и напряжения пробоя без увеличения размера схемы; более высокая надежность, связанная с большей термической стойкостью и с удалением области максимального электрического поля от поверхности в объем устройства. Важной характеристикой силовых преобразователей электрических сигналов является их быстродействие. Использование в таких устройствах полевых транзисторов, в которых отсутствуют процес-

сы накопления и рассасывания неосновных носителей заряда, может быть более предпочтительно, чем использование биполярных транзисторов. Специфика арсенида галлия состоит в том, что у него не существует стабильного, легко формируемого естественного окисла и слишком высока плотность поверхностных состояний. Это не позволяет создавать на основе GaAs высококачественные полевые транзисторы со структурой затвора металл–диэлектрик–полупроводник. Приведенные соображения определяют тип разрабатываемого прибора — полевой транзистор с вертикальным каналом, управляемым p – n -переходом или барьером Шоттки.

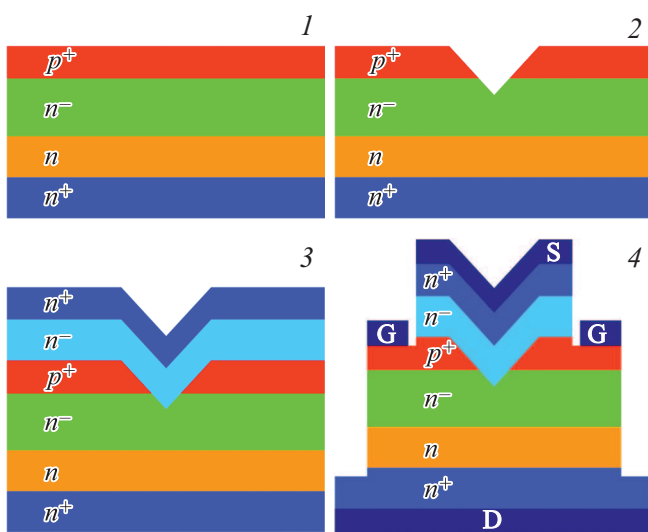


Рис. 1. Технологический маршрут изготовления транзистора (шаги 1–4): 1 — выращивание структуры методом жидкофазной эпитаксии; 2 — анизотропное травление канавки; 3 — зарращивание структуры методом металлоорганической газофазной эпитаксии; 4 — формирование мезаструктуры и контактов.

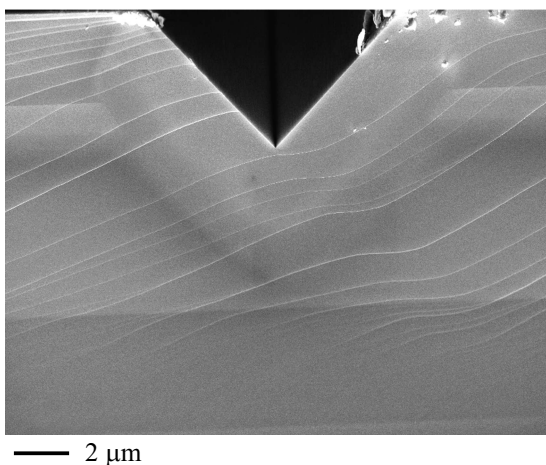


Рис. 2. Изображение скола v -образной канавки после эпитаксиального зарращивания, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа.

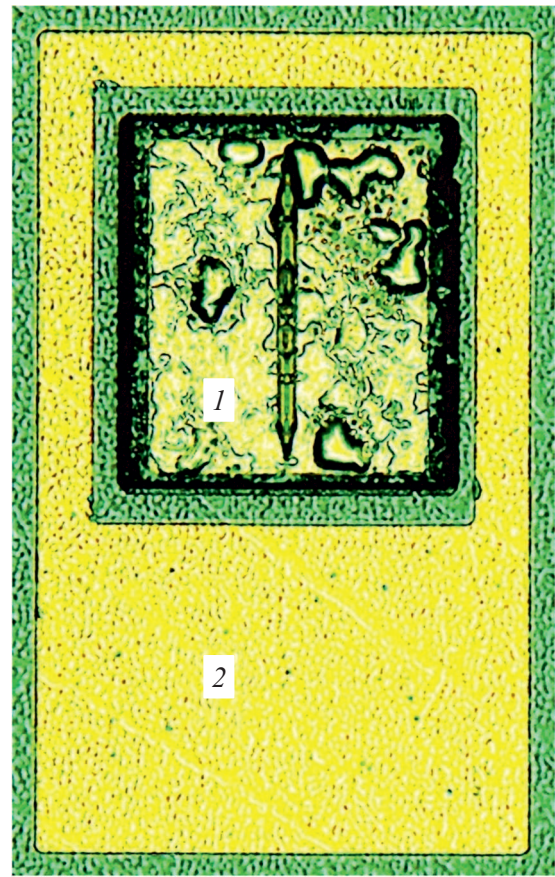


Рис. 3. Фотография изготовленного транзистора с шириной v -образной канавки ~ 3 мкм. 1 — исток, 2 — затвор.

На рис. 1 показан один из возможных вариантов конструкции транзистора с управляющим p – n -переходом, реализованный в настоящей работе, и технологический маршрут его изготовления. Главной технологической особенностью является использование двух отдельных процессов эпитаксиального роста. Часть транзистора, содержащая области стока (нижний слой n^+), дрейфа (нижний слой n^-) и затвора (слой p^+), выращивается методом жидкофазной эпитаксии (шаг 1). На поверхности выращенной структуры методом жидкостного анизотропного травления вытравливается v -образная канавка в слой n^- (шаг 2). Изготовленная структура зарращивается методом металлоорганической газофазной эпитаксии (шаг 3) для формирования областей канала (верхний слой n^-) и истока (верхний слой n^+). После этого формируются мезаструктура и омические контакты истока S, затвора G и стока D (шаг 4).

С целью выбора оптимальной ширины v -образной канавки были изготовлены транзисторы, в которых ширина окна маски при анизотропном травлении отдельной канавки варьировалась в диапазоне 2–9 мкм, длина канавки во всех транзисторах составляла 100 мкм. На рис. 2 приведено изображение v -образной канавки после эпитаксиального зарращивания, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, показы-

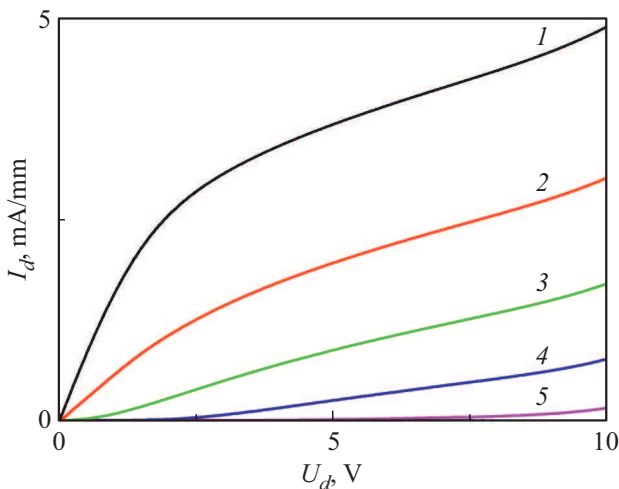


Рис. 4. Выходные характеристики одного из транзисторов с шириной канавки ~ 3 мкм при различных напряжениях на затворе, В: 1 — 0, 2 — (-1), 3 — (-2), 4 — (-3), 5 — (-4).

вающее послыйный характер роста и хорошие морфологические характеристики сформированной поверхности. На рис. 3 приведена фотография транзистора с шириной канавки ~ 3 мкм.

3. Транспортные характеристики транзисторов

Исследуемые транзисторы имели следующие основные параметры полупроводниковой структуры: концентрация легирующей примеси в нижнем слое $n^- = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, его толщина 7.5 мкм; концентрация легирующей примеси в верхнем слое $n^- = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, его толщина 3 мкм; толщина слоя p^+ 1 мкм. Измерения показали, что наилучшими транспортными характеристиками обладают транзисторы с минимальной шириной канавки ~ 3 мкм. Напряжения пробоя стока транзисторов составляют 60–70 В. Наилучшее управление током стока достигается до напряжений стока ~ 10 В, при этом максимальный ток стока ~ 10 мА/мм. В качестве примера на рис. 4 показаны зависимости удельного тока стока I_d от напряжения стока U_d при различных напряжениях на затворе для одного из транзисторов с шириной канавки ~ 3 мкм.

Очевидны пути улучшения транспортных характеристик. Увеличение тока достигается путем увеличения числа канавок и соответственно количества каналов протекания тока. Увеличение удельной величины тока возможно при оптимизации формы канала и распределения легирующей примеси в активной области транзистора. Увеличение пробойного напряжения стока может быть достигнуто за счет увеличения толщины нижнего слоя n^- .

4. Заключение

В работе разработан и изготовлен прототип вертикального полевого транзистора с управляющим p - n -переходом на основе арсенида галлия. Оригинальность подхода заключается в использовании двух отдельных процессов эпитаксиального роста при формировании транзисторной структуры. Часть транзистора, содержащая области стока, затвора и область дрейфа, толщина которой может составлять десятки мкм, выращивается методом жидкофазной эпитаксии. Для формирования областей канала и истока применяется технология металлоорганической газофазной эпитаксии, оптимальная для зарастивания непланарных микроструктур.

Исследованы транспортные характеристики изготовленных транзисторов. Продемонстрирован транзисторный эффект.

Финансирование работы

Исследования проведены в рамках выполнения государственного задания ИФМ РАН (тема № 0035-2014-0205). В работе использовалось оборудование ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Roccaforte, P. Fiorenza, G. Greco, R.L. Nigro, F. Giannazzo, F. Iucolano, M. Saggio. *Microelectron. Engin.*, **187–188**, 66 (2018).
- [2] T. Paul Chow. *Proc. 3rd IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications* (Blacksburg, Virginia, USA, 2015) p. 402.
- [3] Y. Zhang, A. Dadgar, T. Palacios. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51**, 273001 (2018).
- [4] D. Ji, A. Agarwal, H. Li, W. Li, S. Keller, S. Chowdhury. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **39**, 863 (2018).
- [5] D. Ji, C. Gupta, A. Agarwal, S.H. Chan, C. Lund, W. Li, S. Keller, U.K. Mishra, S. Chowdhury. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **39**, 711 (2018).
- [6] В.Л. Крюков, Е.В. Крюков, Л.А. Меерович, С.С. Стрельченко, К.А. Титивкин. *Научомкие технологии*, **15**(2), 42 (2014).
- [7] B. Jayant Baliga. *Gallium Nitride and Silicon Carbide Power Devices* (World Scientific, 2017).

Редактор Л.В. Шаронова

Vertical field-effect transistor with control $p-n$ -junction based on GaAs

*N.V. Vostokov¹, V.M. Daniltsev¹, S.A. Kraev¹,
V.L. Krukov², E.V. Skorokhodov¹, S.S. Strelchenko²,
V.I. Shashkin¹*

¹ Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

² OOO „MeGa Epitech“,
248033 Kaluga, Russia

Abstract The first results on the creation of an original power GaAs field-effect transistor with a vertical channel controlled by a $p-n$ junction are presented. The main technological feature is the use of two separate processes of epitaxial growth in the formation of the transistor structure. The part of the transistor containing the drain, drift and gate areas is grown by liquid-phase epitaxy. The technology of organometallic gas-phase epitaxy is used to form the areas of the channel and the source.