

07.2;08.3

Двухканальная гетероструктура с дополнительными цифровыми потенциальными барьерами для мощных полевых транзисторов

© С.А. Богданов, С.Н. Карпов, А.Б. Пашковский

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

E-mail: solidstate10@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 19 мая 2023 г.

Принято к публикации 19 мая 2023 г.

Представлены первые результаты исследования двухканальных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и системами чередующихся тонких слоев AlAs/GaAs, образующих дополнительные цифровые потенциальные барьеры. Показано, что из-за особенностей поперечного пространственного переноса электронов в предложенной конструкции при увеличении поверхностной плотности электронов с высокой подвижностью вдвое по сравнению с таковой для традиционных одноканальных двусторонне легированных гетероструктур даже в отсутствие цифровых барьеров всплеск дрейфовой скорости не уменьшается. Введение цифровых барьеров значительно повышает всплеск дрейфовой скорости электронов при их влете в область сильного поля, приближая его в соответствующих гетероструктурах к теоретическому пределу для используемой модели — всплеску дрейфовой скорости в нелегированном объемном материале канала.

Ключевые слова: двухканальная структура, цифровые барьеры, полевой транзистор, поперечный пространственный перенос.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.14.55822.19591

В настоящее время продвижение мощных полупроводниковых приборов в миллиметровый диапазон длин волн связано в основном с совершенствованием эпитаксиальных технологий нитрида галлия [1–4]. Однако если перспективность подобных работ на основе нитрид-галлиевых гетероструктур на карбид-кремниевых подложках несомненна, то использование для тех же целей структур на кремниевых подложках вызывает определенные вопросы. Действительно использование кремниевой подложки даже толщиной $50\ \mu\text{m}$ приводит к тому, что из-за более низкой тепловой проводимости кремния по сравнению с тепловой проводимостью карбида кремния удельная мощность транзистора при прочих равных условиях уменьшается минимум в 1.5 раза [5]. В то же время по оценкам, как показано далее, практически те же удельные мощности могут быть получены на арсенид-галлиевых гетероструктурах. Это может как полностью избавить от всех проблем, связанных с технологией „нитрид галлия на кремнии“, так и просто в разы увеличить коэффициент усиления транзистора при равной длине затвора.

Из-за особенностей локализации электронов в каналах традиционных арсенид-галлиевых гетероструктур поверхностная плотность электронов составляет около $3 \cdot 10^{12}\ \text{cm}^{-2}$. Такая поверхностная плотность обеспечивает удельную мощность на уровне $1\text{--}1.2\ \text{W/mm}$. Дальнейшее увеличение поверхностной плотности без существенного изменения конструкции гетероструктуры ведет к заметному падению коэффициента усиления. Однако гетероструктуры на основе арсенида галлия имеют большие возможности для модернизации. Конкретным примером могут служить гетероструктуры с

донорно-акцепторным легированием DA-DpHEMT [6], позволившие поднять удельные мощности промышленных приборов на уровень более $1.5\ \text{W/mm}$ и двукратно увеличить коэффициент усиления, а также гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами Q-DpHEMT [7], позволившие дополнительно почти вдвое увеличить коэффициент усиления транзисторов на их основе. Тем не менее поверхностную плотность электронов с высокой подвижностью в канале таких гетероструктур нельзя сильно увеличивать, так как уровень Ферми в этом случае может оказаться сравним с высотой верхних долин в GaAs. Для увеличения суммарной поверхностной плотности электронов остается, по-видимому, всего один путь — увеличение количества каналов в транзисторной гетероструктуре. Эта идея не нова: многоканальные гетероструктуры предлагались еще на заре разработки мощных гетероструктурных транзисторов [8]. Однако, как известно, на характеристики гетероструктурных транзисторов большое отрицательное влияние оказывает поперечный пространственный перенос электронов [9]. На первом этапе разработки многоканальных гетероструктур, а точнее, до появления стабильных результатов по дельта-легированию возможности эффективно бороться с поперечным пространственным переносом не было. На более поздних этапах этому вопросу, по-видимому, просто не придавали значения [10], делали слишком большое расстояние между каналами, и поэтому результат был соответствующим.

На основе результатов работ [6,7,9] спроектирована двухканальная гетероструктура (Q-DCpHEMT), зонная диаграмма которой приведена на рис. 1, в которой

благодаря введению в конструкцию гетероструктуры цифровых потенциальных барьеров существенно снижено влияние поперечного пространственного переноса электронов на динамику горячих электронов. От стандартных конструкции отличают три короткопериодные сверхрешетки AlAs/GaAs с толщинами слоев 3 и 4 ML соответственно. Со стороны подложки и затвора решетку формируют шесть цифровых потенциальных барьеров, каналы отделены друг от друга сверхрешеткой с четырьмя цифровыми потенциальными барьерами.

Поверхностная плотность электронов в каждом канале (каналы отделены друг от друга набором цифровых потенциальных барьеров) составляет $n_s = 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Со стороны подложки введено дополнительное донорно-акцепторное легирование, минимизирующее уход электронов в подложку и их накопление в короткопериодной сверхрешетке AlAs/GaAs, расположенной в основании активной области гетероструктуры. Со стороны затвора акцепторы предлагается не вносить, эквивалентный эффект достигается за счет поверхностных состояний при наличии сверхрешетки. При отсутствии сверхрешетки поле поверхностных состояний не может удержать горячие электроны в области канала, типовой изгиб зон составляет 0.2–0.3 eV. Именно по этой причине в работах [6,7] использовалось донорно-акцепторное легирование у поверхности гетероструктуры. Под затвором накоплению заряда в сверхрешетке препятствует поле затвора.

Из расчетов по модели [9] видно (рис. 1), что в такой структуре даже при температуре электронного газа 1500 К подавляющее большинство электронов находится в узкозонных каналах. Это в свою очередь приводит к тому, что всплеск дрейфовой скорости электронов при влете в область сильного поля оказывается весьма велик (рис. 2): он практически равен всплеску дрейфо-

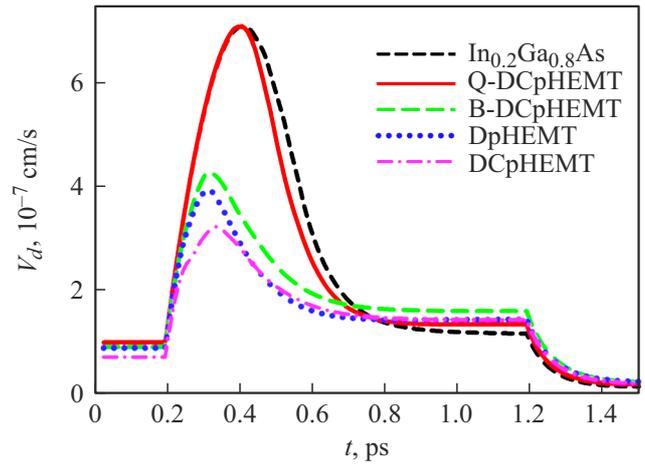


Рис. 2. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при влете электронов в область сильного поля. При $t < 0.2 \text{ ps}$ $E = 1 \text{ kV/cm}$; при $0.2 < t < 1.2 \text{ ps}$ $E = 20 \text{ kV/cm}$; при $t > 1.2 \text{ ps}$ $E = 1 \text{ kV/cm}$.

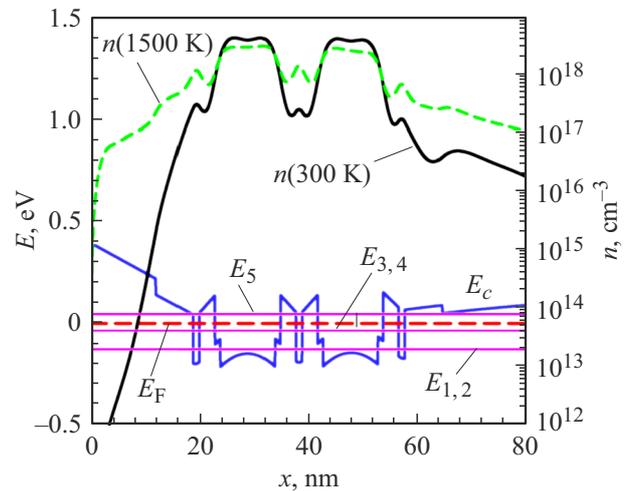


Рис. 3. Зонная диаграмма и распределения концентрации электронов в структуре с двумя каналами без цифровых барьеров. Температура электронного газа 300 К (сплошная линия) и 1500 К (штриховая линия).

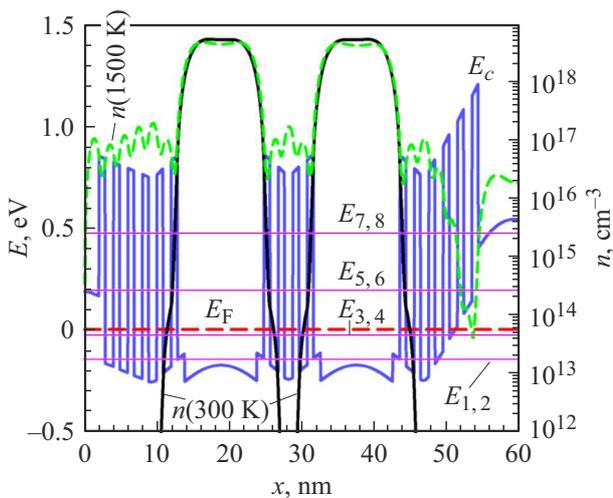


Рис. 1. Зонная диаграмма и распределения концентрации электронов в структуре с двумя каналами и цифровыми барьерами. Температура электронного газа 300 К (сплошная линия) и 1500 К (штриховая линия).

вой скорости электронов в нелегированном $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, что является для используемой модели теоретическим пределом. Если этот результат в свете работ [7,9] в определенной мере предсказуем, то сравнение (см. рис. 2) всплеска дрейфовой скорости в обычной одноканальной двусторонне легированной структуре (традиционный DpHEMT) и двухканальной структуре, выполненной без цифровых барьеров и донорно-акцепторного легирования со стороны подложки (B-DCpHEMT) (рис. 3), оказывается совершенно неожиданным. Всплеск дрейфовой скорости электронов в такой двухканальной структуре оказывается по крайней мере не ниже, чем в структуре традиционного DpHEMT-транзистора. Скорее всего, это связано с тем, что использование дельта-легирования

в отличие от предыдущих работ по многоканальным транзисторам делает область интенсивного рассеяния достаточно узкой. Естественно, если убрать внутренние спейсеры (барьеры по краям внутреннего дельта-слоя), интенсивность рассеяния заметно возрастет (рис. 2) и всплеск дрейфовой скорости электронов сильно уменьшится (ДСрНЕМТ).

Таким образом, с учетом результатов [6] по теоретическим оценкам на основе гетероструктур с двойным каналом без цифровых барьеров могут быть получены удельные выходные мощности на уровне 3–4 W/mm при коэффициенте усиления, близком к коэффициенту усиления традиционных ДрНЕМТ-транзисторов. Введение в конструкцию гетероструктур с двойным каналом цифровых барьеров и донорно-акцепторного легирования со стороны подложки позволит увеличить коэффициент усиления как минимум на 3–4 dB при сохранении и даже некотором росте удельной выходной мощности. Естественно, из-за тепловых эффектов получить на арсенид-галлиевом приборе такую мощность без изменения его конструкции возможно только в импульсных режимах. Для непрерывных режимов работы с высокой удельной выходной мощностью необходимо как минимум уменьшать толщину подложки до 25 μm и соответственно увеличивать расстояние между „пальцами“ прибора.

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]. URL: 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] Nidhi, S. Dasgupta, S. Keller, J.S. Speck, U.K. Mishra, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **32** (12), 1683 (2011). DOI: 10.1109/LED.2011.2168558
- [4] 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
- [5] В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, И.В. Пашковская, *Письма в ЖТФ*, **49** (2), 10 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.02.54278.19327 [V.M. Lukashin, A.B. Pashkovskii, I.V. Pashkovskaya, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (1), 51 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.01.55349.19327].
- [6] 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. Щербakov, *Письма в ЖТФ*, **42** (16), 41 (2016). [A.A. Borisov, K.S. Zhuravlev, S.S. Zyrin, V.G. Lapin, V.M. Lukashin, A.A. Makovetskaya, V.I. Novoselets, A.B. Pashkovskii, A.I. Toropov, N.D. Ursulyak, S.V. Shcherbakov, *Tech. Phys. Lett.*, **42** (8), 848 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016080198].
- [7] A.B. Pashkovskii, S.A. Bogdanov, A.K. Bakarov, A.B. Grigorenko, K.S. Zhuravlev, V.G. Lapin, V.M. Lukashin, I.A. Rogachev, E.V. Tereshkin, S.V. Shcherbakov, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **68** (1), 53 (2021). DOI: 10.1109/TED.2020.3038373
- [8] N.H. Sheng, C.P. Lee, R.T. Chen, D.L. Miller, S.J. Lee, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **6** (6), 307 (1985). DOI: 10.1109/EDL.1985.26134
- [9] А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, И.А. Rogachev, Е.В. Терешкин, *ФТП*, **57** (1), 21 (2023). DOI: 10.21883/FTP.2023.01.54926.355
- [10] K.-Y. Chu, S.-Y. Cheng, M.-H. Chiang, Y.-J. Liu, C.-C. Huang, T.-Y. Chen, C.-S. Hsu, W.-C. Liu, W.-Y. Cheng, B.-C. Lin, *Solid-State Electron.*, **72**, 22 (2012). DOI: 10.1016/j.sse.2011.09.009