

07.2;08.3

Гетероструктура с дополнительными цифровыми потенциальными барьерами для малошумящих полевых транзисторов

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

АО „НПП „Исток“ им. Шокина“, Фрязино, Московская обл., Россия
E-mail: solidstate10@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 марта 2024 г.

В окончательной редакции 5 апреля 2024 г.

Принято к публикации 9 апреля 2024 г.

Представлены первые результаты теоретического исследования гетероструктур для малошумящих транзисторов с донорно-акцепторным легированием и системами чередующихся тонких слоев AlAs/GaAs, образующих дополнительные цифровые потенциальные барьеры. Введение цифровых барьеров практически полностью устраняет канал параллельной проводимости по широкозонному материалу, значительно повышает всплеск дрейфовой скорости электронов при влете их в область сильного поля. Всплеск дрейфовой скорости в соответствующих гетероструктурах приближается к теоретическому пределу для используемой модели — всплеску дрейфовой скорости электронов в нелегированном объемном материале канала.

Ключевые слова: цифровые потенциальные барьеры, полевой транзистор, всплеск дрейфовой скорости электронов.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.14.58311.19910

С момента появления первых публикаций [1,2] и до настоящего времени ведутся работы, направленные на исследование и совершенствование гетероструктур для малошумящих транзисторов [3–6]. Несмотря на значительный прогресс в этом направлении [7] в гетероструктурах на основе арсенида галлия, до сих пор в должной мере не решена и остается актуальной такая важная проблема, как паразитная проводимость по широкозонному материалу с прямым рассеянием электронов на легирующей примеси. Как было впервые показано более 30 лет назад [8,9], перенос горячих носителей в реальном пространстве существенно влияет на коэффициент шума полевых транзисторов, что подтверждается и современными исследованиями [10,11]. В то же время проблема паразитной проводимости для мощных транзисторов уже получила несколько довольно эффективных путей решения, позволивших как существенно увеличить коэффициент усиления изготовленных приборов [12], так и разработать конструкции гетероструктур, в которых исходя из результатов моделирования электронного транспорта всплеск дрейфовой скорости электронов доведен до его теоретического предела [13,14]. Представляет интерес исследовать возможность применения этих технических решений и для гетероструктур малошумящих транзисторов.

На рис. 1 приведена зонная диаграмма одного из многочисленных вариантов типовой односторонне легированной гетероструктуры $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ для малошумящего транзистора (НЕМТ). Расчет проводился на основе решения системы самосогласованных уравнений Шредингера и Пуассона [15] со стандартными для таких задач граничными условиями (см., например, [16]). Толщина слоя $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ между поверхностью и

каналом составляет 13 nm, ширина квантовой ямы канала ($\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$) — 12 nm, далее идет слой нелегированного GaAs толщиной 30 nm, затем толстый слой $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$. В первом варианте расчета затвор отсутствует, на свободной поверхности предполагается наличие ионизированных поверхностных состояний акцепторного типа с поверхностной плотностью 10^{12} cm^{-2} . На расстоянии 9.5 nm от поверхности структура δ -легирована с поверхностной плотностью доноров $n_s = 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. По краям δ -слоя расположены тонкие слои GaAs толщиной по три монослоя. Для простоты анализа предполагается 100% ионизация легирующей примеси, т.е. полная поверхностная плотность электронов с учетом ловушек составляет $n_s = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Видно (и это не раз отмечалось ранее [7]), что при такой высокой поверхностной плотности электронов значительная часть носителей заряда (в данном случае около 25%) даже при комнатной температуре находится в широкозонном материале в области легирования, что создает параллельный канал проводимости по широкозонному материалу с прямым рассеянием на ионизованной примеси. При температуре электронного газа 1500 K доля электронов в слое между каналом и поверхностью увеличивается до 30%. Для малошумящего транзистора, работающего при напряжениях на затворе, близких к напряжению перекрытия, на первый взгляд это не очень важно, однако этот эффект приводит к увеличению омического сопротивления истока и отрицательно влияет на динамику электронов при влете под затвор и вылете из-под затвора, а также при их движении к стоку и таким образом ухудшает характеристики прибора.

Если рассматривать структуры AlGaAs/GaAs, то существует по крайней мере три крайне эффективных способа

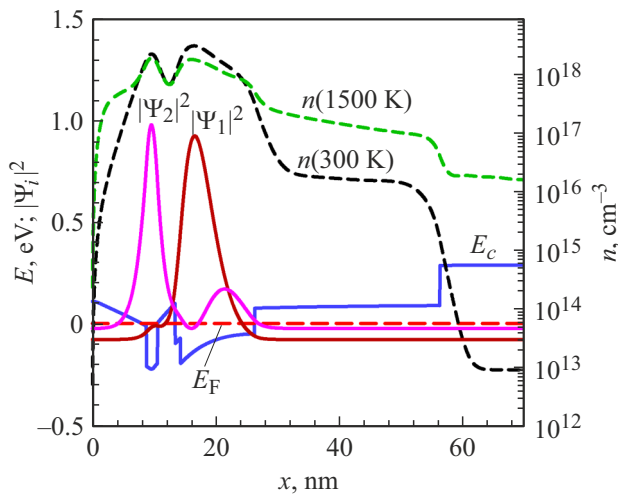


Рис. 1. Зонная диаграмма НЕМТ-гетероструктуры малощумящего транзистора, концентрация и волновые функции электронов. Квадраты волновых функций отложены от высоты соответствующего уровня.

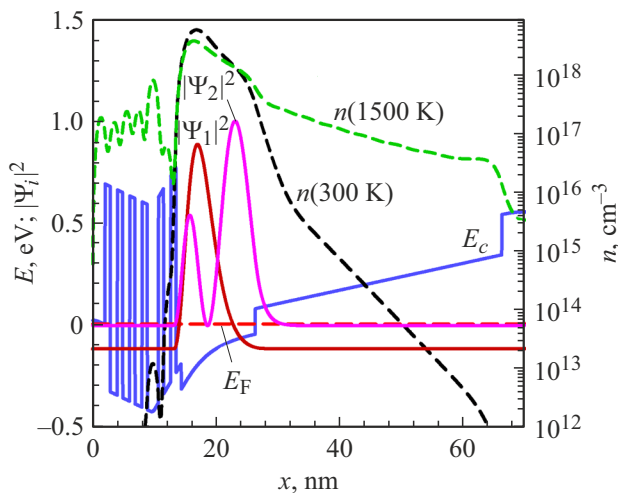


Рис. 2. Зонная диаграмма гетероструктуры с дополнительными цифровыми барьерами и акцепторным легированием со стороны подложки, концентрация и волновые функции электронов. Квадраты волновых функций отложены от высоты соответствующего уровня.

борьбы с проблемой паразитной проводимости: донорно-акцепторное легирование [15] и введение цифровых барьеров [14], а также комбинация этих способов.

На рис. 2 приведена зонная диаграмма Q-НЕМТ-гетероструктуры, отличающейся от исходной (НЕМТ) дополнительными цифровыми барьерами и акцепторным легированием со стороны подложки. В предлагаемом улучшенном варианте конструкции гетероструктуры малощумящего транзистора (Q-НЕМТ) между поверхностью и δ -слоем вставлены четыре цифровых барьера AlAs толщиной три монослоя каждый. Два таких же барьера вставлены в спейсер между каналом и δ -слоем.

Слой GaAs увеличен на 10 nm, а край слоя $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ со стороны подложки легирован акцепторной примесью с поверхностной концентрацией $0.5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (легирование акцепторами введено для улучшения перекрытия транзистора). На эту же величину увеличена и поверхностная плотность доноров в δ -слое. Таким образом, поверхностная плотность электронов в канале осталась равной $n_s = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Видно, что в такой структуре локализация электронов в канале гораздо сильнее. Так, при температуре электронного газа $T = 300 \text{ K}$ в широкозонном материале находится менее 0.03% электронов, а при $T = 1500 \text{ K}$ — менее 3%. Это приводит к тому (рис. 3), что всплеск дрейфовой скорости электронов, рассчитанный в такой структуре по модели [15], становится близок к всплеску дрейфовой скорости в чистом объемном материале канала — теоретическому пределу для данной модели. Следует также отметить, что в структуре с цифровыми барьерами расстояние между первыми тремя квантовыми уровнями существенно больше энергии оптического фотона, что может дополнительно увеличивать дрейфовую скорость электронов [17] в таких структурах. Кроме того, омический контакт истока полевого транзистора состоит из двух частей: сопротивление непосредственно самого контакта и сопротивление участка полупроводника между металлическим контактом и затвором. Последнее в транзисторах на основе Q-НЕМТ-гетероструктур заведомо будет ниже, что также должно приводить к снижению коэффициента шума.

В исходной структуре со свободной поверхностью, что соответствует режиму полностью открытого транзистора, всплеск дрейфовой скорости меньше почти вдвое (НЕМТ, $U_g = 0$). При напряжениях на затворе,

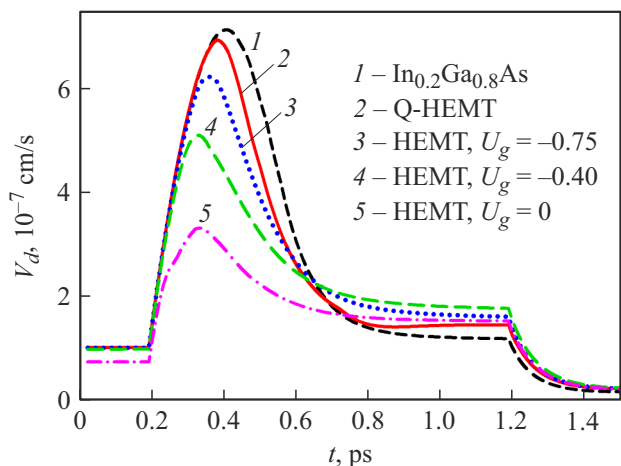


Рис. 3. Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при их влете в область сильного поля. При $t < 0.2 \text{ ps}$ $E = 1 \text{ kV/cm}$; при $0.2 < t < 1.2 \text{ ps}$ $E = 20 \text{ kV/cm}$; при $t > 1.2 \text{ ps}$ $E = 1 \text{ kV/cm}$. Q-НЕМТ — структура с цифровыми барьерами, НЕМТ — исходная структура при различных напряжениях на затворе, $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ — объемный материал канала. $U_g = 0$ соответствует варианту структуры со свободной поверхностью, когда затвор отсутствует.

близких к напряжению перекрытия (при изменении потенциала относительно свободной поверхности на величину $U_g = -0.75 \text{ V}$ $n_s \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$), всплеск дрейфовой скорости в такой структуре оказывается также достаточно велик (всего на 10% меньше его величины в структуре Q-HEMT). Однако, как отмечалось выше, даже под очень коротким затвором потенциальный рельеф структуры будет меняться от полностью открытого (при влете под затвор) до практически закрытого (у его стокового края), что и приведет к уменьшению средней дрейфовой скорости под затвором, а соответственно и к росту коэффициента шума.

В предлагаемой Q-HEMT-гетероструктуре всплеск дрейфовой скорости электронов приближен к теоретическому пределу для используемой модели — всплеску дрейфовой скорости электронов в нелегированном объемном материале канала. Соответственно наилучшие характеристики продемонстрирует транзистор на основе Q-HEMT-структуры [18]. Следует отметить, что подобный результат был получен и для обращенных структур с цифровыми потенциальными барьерами в [19] при близких значениях поверхностной плотности электронов в канале. Поэтому при оценке целесообразности применения этих структур на практике на первое место могут выйти другие факторы, например технологичность изготовления структур или транзисторов на их основе.

Таким образом, показано, что введение в конструкцию гетероструктур малолегированных полевых транзисторов цифровых потенциальных барьеров может приводить к исчезновению в них канала паразитной проводимости по легированному широкозонному материалу. Всплеск дрейфовой скорости электронов в таких структурах, согласно расчетам, приближается к своему теоретическому пределу — всплеску дрейфовой скорости в объемном материале канала. Поэтому в приборах на основе Q-HEMT-структур будет увеличиваться средняя скорость электронов под затвором, что приведет к увеличению рабочих частот и уменьшению коэффициента шума.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Mimura, S. Hiyamizi, H. Hashimoto, M. Fukuta, IEEE Trans. Electron Dev., **27** (11), 2197 (1980). DOI: 10.1109/T-ED.1980.20234
- [2] А.С. Тагер, А.А. Кальфа, *Полевой транзистор*, а.с. № 897062 (СССР) (приоритет от 03.09.1980).
- [3] Д.С. Пономарев, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Р.А. Хабибуллин, В.А. Кульбачинский, Н.А. Юзева, ФТП, **46** (4), 500 (2012). [D.S. Ponomarev, I.S. Vasil'evskii, G.B. Galiev, E.A. Klimov, R.A. Khabibullin, V.A. Kulbachinskii, N.A. Uzeeva, Semiconductors, **46** (4), 484 (2012). DOI: 10.1134/S1063782612040173].
- [4] А.Н. Виниченко, Д.А. Сафонов, Н.И. Каргин, И.С. Васильевский, ФТП, **53** (3), 359 (2019). DOI: 10.21883/FTP.2019.03.47288.9001 [A.N. Vinichenko, D.A. Safonov, N.I. Kargin, I.S. Vasil'evskii, Semiconductors, **53** (3), 339 (2019). DOI: 10.1134/S1063782619030205].
- [5] F. Heinz, F. Thome, A. Leuther, O. Ambacher, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **69** (8), 3896 (2021). DOI: 10.1109/TMTT.2021.3081710
- [6] H.-B. Jo, J.-M. Baek, D.-Y. Yun, S.-W. Son, J.-H. Lee, T.-W. Kim, D.-H. Kim, T. Tsutsumi, H. Sugiyama, H. Matsuzaki, IEEE Electron Dev. Lett., **39** (11), 1640 (2018). DOI: 10.1109/LED.2018.2871221
- [7] А.Н. Виниченко, В.П. Гладков, Н.И. Каргин, М.Н. Стриханов, И.С. Васильевский, ФТП, **48** (12), 1660 (2014). [A.N. Vinichenko, V.P. Gladkov, N.I. Kargin, M.N. Strikhanov, I.S. Vasil'evskii, Semiconductors, **48** (12), 1619 (2014). DOI: 10.1134/S1063782614120227].
- [8] А.А. Кальфа, А.Б. Пашковский, А.С. Тагер, Микроэлектроника, **20** (4), 383 (1991).
- [9] А.Б. Пашковский, Микроэлектроника, **22** (3), 58 (1993).
- [10] F. Heinz, F. Thome, A. Leuther, O. Ambacher, in *2020 IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp. (IMS)* (IEEE, 2020), p. 293–296. DOI: 10.1109/IMS30576.2020.9223783
- [11] I. Esho, A.Y. Choi, A.J. Minnich, J. Appl. Phys., **131** (8), 085111 (2022). DOI: 10.1063/5.0069352
- [12] А.Б. Пашковск, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, И.А. Григоренко, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, И.А. Рогачев, Е.В. Терешкин, С.В. Шчербак, IEEE Trans. Electron Dev., **68** (1), 53 (2021). DOI: 10.1109/TED.2020.3038373
- [13] А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, С.Н. Карпов, И.А. Рогачев, Е.В. Терешкин, ФТП, **57** (1), 21 (2023). DOI: 10.21883/FTP.2023.01.54926.3554 [A.B. Pashkovskii, S.A. Bogdanov, A.K. Bakarov, K.S. Zhuravlev, V.G. Lapin, V.M. Lukashin, S.N. Karpov, I.A. Rogachev, E.V. Tereshkin, Semiconductors, **57** (1), 20 (2023). DOI: 10.21883/SC.2023.01.55616.3554].
- [14] С.А. Богданов, С.Н. Карпов, А.Б. Пашковский, Письма в ЖТФ, **49** (14), 28 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.14.55822.19591 [S.A. Bogdanov, S.N. Karpov, A.B. Pashkovskii, Tech. Phys. Lett., **49** (7), 65 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.07.56449.19591].
- [15] А.Б. Пашковский, А.С. Богданов, В.М. Лукашин, С.И. Новиков, Микроэлектроника, **49** (3), 210 (2020). DOI: 10.31857/S0544126920030059 [A.B. Pashkovskii, A.S. Bogdanov, V.M. Lukashin, S.I. Novikov, Russ. Microelectron., **49** (3), 195 (2020). DOI 10.1134/S1063739720030051].
- [16] А.А. Кальфа, ФТП, **20** (3), 468 (1986).
- [17] E. Kablukova, K.K. Sabelfeld, D. Protasov, K. Zhuravlev, Monte Carlo Meth. Appl., **29** (4), 307 (2023). DOI: 10.1515/mcma-2023-2019
- [18] A. Cappy, B. Carnev, R. Fauquembergues, G. Salmer, E. Constant, IEEE Trans. Electron Dev., **27** (11), 2158 (1980). DOI: 10.1109/T-ED.1980.20166
- [19] Е.В. Терешкин, Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, В. 4 (555), 64 (2022).