

07.2;08.3

Нелокальная динамика электронов в AlGaN/GaN-транзисторных гетероструктурах

© С.А. Богданов, А.А. Борисов, С.Н. Карпов, М.В. Кулиев, А.Б. Пашковский, Е.В. Терёшкин

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

Поступило в Редакцию 18 августа 2021 г.

В окончательной редакции 1 октября 2021 г.

Принято к публикации 15 октября 2021 г.

Проведено сравнение нелокального разогрева электронов в транзисторных гетероструктурах на основе нитрида и арсенида галлия. Показано, что поперечный пространственный перенос электронов между слоями двойных псевдоморфных GaAs-гетероструктур в разы уменьшает величину всплеска их дрейфовой скорости при влете в область сильного поля по сравнению с его величиной в чистом объемном GaAs, а для гетероструктур на основе GaN аналогичный эффект не превышает 30%.

Ключевые слова: поперечный пространственный перенос, гетероструктура, всплеск дрейфовой скорости.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.02.51922.18996

Основной тенденцией современной мощной твердотельной электроники в миллиметровом диапазоне длин волн является развитие технологий нитрида галлия. Транзисторы на его основе демонстрируют рекордные значения удельной мощности в различных частотных диапазонах [1], уверенно закрепились в W-диапазоне [2] и продвинулись почти до терагерц [3]. Соответственно делаются положительные прогнозы относительно дальнейшего продвижения по рабочим частотам. В литературе постоянно появляются сообщения о методах улучшения характеристик нитрид-галлиевых приборов: увеличения их мощности, крутизны, улучшения линейности [4–6]. Причины преимущества нитрид-галлиевых транзисторов по удельной мощности очевидны: высокая теплопроводность подложек из карбида кремния, большая величина запрещенной зоны и высокая поверхностная плотность электронов. Даже в нелегированных гетероструктурах AlGaIn/GaN последняя достигает величин порядка 10^{13} cm^{-2} [7]. При этом в [6] сообщается о том, что введение в гетероструктуру градиентных слоев AlGaIn, мольная доля алюминия в которых представлена функцией координаты, также дает дополнительный прирост поверхностной концентрации. Однако достаточно высокий коэффициент усиления этих приборов вызывает определенные вопросы. Как было неоднократно показано [8,9], по частотным свойствам чистый объемный нитрид галлия сильно уступает чистому объемному арсениду галлия. В то же время сравнение мощных GaAs-транзисторов на основе двойных псевдоморфных гетероструктур (DrHEMT) с приборами на основе GaN-гетероструктур показывает, что при одинаковых длинах коротких затворов коэффициент усиления GaN-транзисторов часто оказывается не меньше, чем у GaAs-аналогов. Таким образом, транзисторы на основе гетероструктур AlGaIn/GaN по максимальным рабочим частотам практически не уступают, а иногда и превос-

ходят приборы на основе традиционных псевдоморфных гетероструктур. Объяснение этого эффекта, основанное на том, что в GaN в сильных полях дрейфовая скорость электронов больше, чем в GaAs, не выдерживает никакой критики [9]. Не объясняется это количественно и более близким расположением к затвору канала в GaN-приборах, а также соответствующим уменьшением краевых эффектов и ростом крутизны исток–затвор. Для прояснения этой ситуации представляет интерес рассмотреть нелокальный транспорт электронов в гетероструктурах современных СВЧ-транзисторов, изготовленных на основе различных материалов, поскольку динамика горячих электронов в гетероструктурах сильно отличается от их поведения в объеме. Так, для структур на основе GaAs при анализе нелокального разогрева электронов большое значение имеет учет переходов электронов между слоями гетероструктуры (поперечного пространственного переноса) [10], которые сильно снижают дрейфовую скорость электронов под затвором транзистора.

Расчеты проводились по модели [10]. Транспорт горячих электронов в продольном направлении описывался на основе системы уравнений гидродинамики с феноменологическими временами релаксации электронов по импульсу и энергии. Для описания распределения электронов в поперечном направлении при разных температурах электронного газа использовалось решение стандартной самосогласованной системы уравнений Шредингера–Пуассона. В итоге система гидродинамических уравнений и система уравнений Шредингера–Пуассона решались самосогласованно.

Используемая гидродинамическая модель хорошо описывает динамику электронов в объемных материалах [8,11], однако очевидно, что механизмы рассеяния в гетероструктурах существенно отличаются от объемных. Кроме того, динамика электронов может носить доволь-

но сложный характер [12–17]. Можно предположить, что достаточно корректное численное описание транспорта электронов в таких системах может быть достигнуто как минимум на основании решения кинетического уравнения. В этой области достигнут серьезный прогресс [18], но пока подобные модели оказываются довольно сложными для полного анализа рассматриваемых проблем. Поэтому из-за своей простоты используемая модель, скорее всего, довольно грубо описывает динамику горячих электронов. Кроме того, в канале реального транзистора распределение напряженности электрического поля носит не ступенчатый, а несколько другой характер, зависящий от конкретного режима работы прибора, что заметно сказывается на распределениях дрейфовой скорости электронов. Поэтому в плане предельных частот полевых транзисторов используемая модель позволяет получать только качественные результаты.

Рассматривались две структуры: типичная структура GaAs ДрНЕМТ-транзистора и структура нитрид-галлиевого НЕМТ-транзистора. В структуре $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ширина квантовой ямы составляла 12 nm, расстояние от поверхности до канала было равно 31.5 nm, поверхностная плотность электронов составляла $3.4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Структура GaN-транзистора включала в себя нелегированный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ толщиной $d = 22 \text{ nm}$ с мольной долей $x = 0.18$ и слой GaN толщиной $d = 450 \text{ nm}$. Эффективная ширина канала оказалась приблизительно равна 4 nm, а расчетная поверхностная плотность носителей заряда составила порядка $9.6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Следует отметить, что в данной модели в обоих случаях динамика электронов слабо зависит от расстояния до поверхности.

Расчеты проведены для электронов, которые двигались 0.2 ps в слабом поле 1 kV/cm, затем 1 ps в сильном поле и далее опять в слабом поле. Напряженность сильного поля подбиралась так, чтобы примерно соответ-

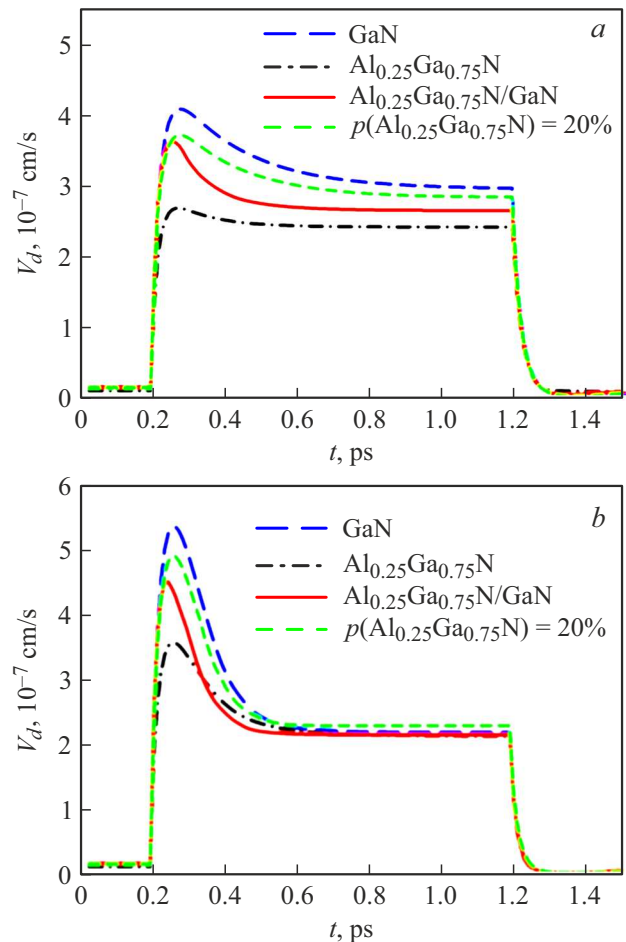


Рис. 2. Зависимость дрейфовой скорости электронов от времени для структуры AlGaN/GaN. Напряженность электрического поля: при $t = 0-0.2$ и $1.2-1.5 \text{ ps}$ $E = 1 \text{ kV/cm}$, при $t = 0.2-1.2 \text{ ps}$ $E = 200$ (a) и 300 kV/cm (b).

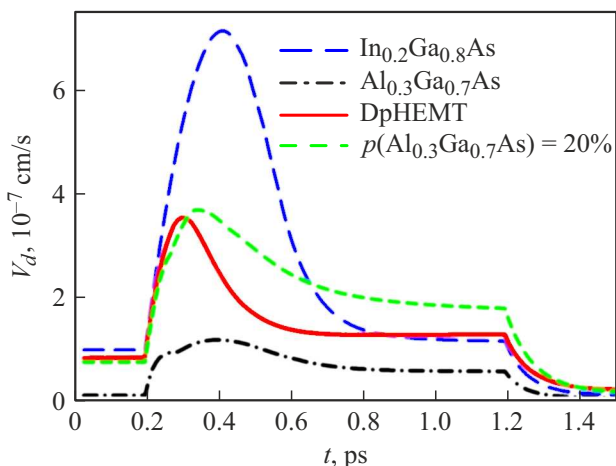


Рис. 1. Зависимость дрейфовой скорости электронов от времени для ДрНЕМТ-структуры. Напряженность электрического поля: при $t = 0-0.2$ и $1.2-1.5 \text{ ps}$ $E = 1 \text{ kV/cm}$, при $t = 0.2-1.2 \text{ ps}$ $E = 20 \text{ kV/cm}$.

ствовать средней напряженности в канале транзистора с коротким затвором. Для наглядности на рис. 1 и 2 приведены зависимости дрейфовой скорости электронов от времени в рассматриваемых гетероструктурах, полученные в результате строгого расчета по используемой модели (кривые для ДрНЕМТ и $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$), приближенного расчета, когда вероятность нахождения электронов в широкозонном материале не определяется исходя из решения самосогласованной задачи, а изначально принимается равной 20% (кривые, обозначенные $p(\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}) = 20\%$ и $p(\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}) = 20\%$), а также зависимости дрейфовой скорости электронов от времени в объемных материалах (кривые для $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и GaN, $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$), позволяющие теоретически оценить нижний и верхний пределы дрейфовой скорости.

Для первой гетероструктуры результаты расчетов приведены на рис. 1. Видно, что в гетероструктуре на основе GaAs переходы электронов между слоями сильно влияют на их дрейфовую скорость. Очевидно,

что происходит это из-за того, что скорости электронов в $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ сильно различаются, особенно в случае нелокальной динамики. Так, в итоге при переходе 20% электронов в широкозонный материал (вероятность изначально задана) величина всплеска падает почти в 2 раза. В условиях, когда вероятность зависит от температуры электронов (самосогласованный расчет), падение еще больше. Кроме того, вдвое падает и длительность всплеска. В то же время для структур на основе нитрида галлия ситуация совершенно другая. Нелокальная динамика электронов в GaN и $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ различается не слишком сильно (рис. 2).

Зависимости дрейфовой скорости от времени для гетероструктуры $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ должны находиться где-то между аналогичными зависимостями для чистого GaN и $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$. Соответственно зависимости всплеска дрейфовой скорости электронов как в самосогласованном расчете для гетероструктуры, так и при заданной вероятности нахождения в 20% в широкозонном материале не слишком сильно отличаются от зависимости в чистом GaN. Таким образом, для всех рассмотренных случаев максимальное уменьшение дрейфовой скорости составляет менее 30%. Следует отметить, что, вообще говоря, мольная доля алюминия в подобных структурах может несколько изменяться, поэтому для расчета динамики закладывались частоты рассеяния для $x = 25\%$, т.е. рассматривался худший возможный вариант.

Таким образом, одним из важных факторов, объясняющих высокие усилительные характеристики GaN-гетероструктур, является удачный состав компонентов гетеропары (динамика в узкозонном и широкозонном материалах не слишком различается). Исходя из этого можно сделать следующие выводы. С одной стороны, существенно увеличить скорость электронов в гетероструктурах на основе GaN без использования принципиально новых подходов будет весьма затруднительно в отличие от такой возможности для арсенид-галлиевых гетероструктур [10]. Это, несомненно, будет препятствовать дальнейшему продвижению приборов на основе GaN-гетероструктур вверх по частотному диапазону. С другой стороны, в транзисторных гетероструктурах на основе GaN в отличие от структур на основе GaAs дрейфовая скорость электронов будет слабо зависеть от профиля дна зоны проводимости гетероструктуры. Для НЕМТ на основе GaN это открывает широкие возможности улучшения их чисто „транзисторных“ свойств, например уменьшения эффективной ширины канала для горячих электронов с целью уменьшения крутизны затвор–сток, минимизации расстояния затвор–канал для увеличения крутизны затвор–исток и соответственно снижения влияния паразитных элементов и т. д.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello, D.P. Nguyen, H. Wang, A.-V. Pham, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, **68** (7), 2957 (2020). DOI: 10.1109/TMTT.2020.2989792
- [2] M. Micovic, A. Kurdoghlian, A. Margomenos, D.F. Brown, K. Shinohara, S. Burnham, I. Milosavljevic, R. Bowen, A.J. Williams, P. Hashimoto, R. Grabar, C. Butler, A. Schmitz, P.J. Willadsen, D.H. Chow, in *2012 IEEE/MMT-S Int. Microwave Symp. Digest* (IEEE, 2012), p. 1. DOI: 10.1109/MWSYM.2012.6259572
- [3] 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
- [4] S. Rahman, N.A. Farhana Othman, S.W. Muhamad Hatta, N. Soin, *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, **6** (12), 805 (2017). DOI: 10.1149/2.0131712jss
- [5] S. Bajaj, Z. Yang, F. Akyol, P.S. Park, Y. Zhang, A.L. Price, S. Krishnamoorthy, D.J. Meyer, S. Rajan, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **64** (8), 3114 (2017). DOI: 10.1109/TED.2017.2713784
- [6] M.G. Ancona, J.P. Calame, D.J. Meyer, S. Rajan, B.P. Downey, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **66** (5), 2151 (2019). DOI: 10.1109/TED.2019.2904005
- [7] T.R. Lenka, A.K. Panda, *Semiconductors*, **45** (5), 650 (2011). DOI: 10.1134/S1063782611050198
- [8] B.E. Foutz, S.K. O'Leary, M.S. Shur, L.F. Eastman, *J. Appl. Phys.*, **85** (11), 7727 (1999). DOI: 10.1063/1.370577
- [9] А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, Я.Б. Мартынов, В.Г. Лапин, А.А. Капралова, И.А. Анисимов, *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*, В. 4, 5 (2014).
- [10] А.Б. Пашковский, С.И. Новиков, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, Я.Б. Мартынов, *Письма в ЖТФ*, **44** (17), 103 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.17.46577.17372 [A.B. Pashkovskii, S.I. Novikov, V.G. Lapin, V.M. Lukashin, Ya.B. Martynov, *Tech. Phys. Lett.*, **44** (9), 804 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018090092].
- [11] M. Shur, *Electron. Lett.*, **12** (23), 615 (1976).
- [12] R. Sakamoto, K. Akai, M. Inoue, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **36** (10), 2344 (1989).
- [13] А.А. Кальфа, А.Б. Пашковский, *ФТП*, **24** (3), 521 (1990).
- [14] Н.З. Вагидов, З.С. Грибников, В.М. Иващенко, *ФТП*, **23** (2), 304 (1989).
- [15] Н.З. Вагидов, З.С. Грибников, В.М. Иващенко, *ФТП*, **24** (6), 1087 (1990).
- [16] В.Б. Горфинкель, С.Г. Шофман, *ФТП*, **22** (5), 793 (1988).
- [17] А.Б. Пашковский, С.А. Богданов, *Письма в ЖТФ*, **45** (20), 11 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.20.48385.17925 [A.B. Pashkovskii, S.A. Bogdanov, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (10), 1020 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019100286].
- [18] D.Yu. Protasov, K.S. Zhuravlev, *Solid-State Electron.*, **29**, 66 (2017). DOI: 10.1016/j.sse.2016.12.013