

07.2;08.3

## Всплеск дрейфовой скорости электронов в обращенных транзисторных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами

© А.Б. Пашковский<sup>1</sup>, С.А. Богданов<sup>1</sup>, А.К. Бакаров<sup>2</sup>, К.С. Журавлев<sup>2</sup>, В.Г. Лапин<sup>1</sup>, В.М. Лукашин<sup>1</sup>, С.Н. Карпов<sup>1</sup>, Д.Ю. Протасов<sup>2</sup>, И.А. Рогачёв<sup>1</sup>, Е.В. Терёшкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО „НПП „Исток“ им. А.И. Шокина“, Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>2</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: solidstate10@mail.ru, zhur@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 4 марта 2022 г.

В окончательной редакции 4 марта 2022 г.

Принято к публикации 29 апреля 2022 г.

Представлены первые результаты исследования дрейфовой скорости электронов в обращенных псевдоморфных гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs с донорно-акцепторным легированием и короткопериодными сверхрешетками AlAs/GaAs. Теоретически показано, что введение сверхрешеток значительно (до 1.5 раз) повышает всплеск дрейфовой скорости электронов при влете их в область сильного поля. В сверхрешетке между квантовой ямой и подложкой обнаружены локализованные состояния. Показано, что этот эффект ведет к дополнительному увеличению всплеска дрейфовой скорости электронов вплоть до теоретического предела для используемой модели — всплеска дрейфовой скорости в объемном материале квантовой ямы.

**Ключевые слова:** обращенная гетероструктура, цифровые барьеры, полевой транзистор, коэффициент усиления.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.12.52671.19184

Постоянный рост потоков информации требует увеличения пропускной способности каналов связи и соответственно увеличения рабочих частот приема и передачи. Предполагается, что один из возможных стандартов связи 6G будет работать в районе 300 GHz. В свою очередь это требует достаточно мощных, надежных и желательного недорогого усилителей мощности. В настоящее время продвижение мощных полупроводниковых транзисторов в миллиметровый диапазон длин волн связано в основном с совершенствованием эпитаксиальных технологий нитрида галлия [1–4]. Однако промышленное применение таких приборов на частотах заметно выше 100 GHz пока выглядит достаточно проблематичным [4]. Поэтому для изготовления полевых транзисторов и усилителей для работы на длинах волн менее 2 mm в основном используются метаморфные гетероструктуры AlGaAs/InGaAs на подложках GaAs и гетероструктуры AlInAs/InGaAs на подложках InP [5,6] с узкозонным каналом  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с молярным содержанием индия  $x = 0.8$  и выше. По усилительным характеристикам транзисторы на таких структурах в настоящее время не имеют конкурентов. Однако узкая запрещенная зона канала приводит к низким пробивным напряжениям и соответственно малым удельным выходным мощностям. В то же время есть еще один перспективный путь продвижения вверх по частотному диапазону, позволяющий резко увеличить удельную мощность и коэффициент усиления полевых транзисторов [7,8], — использование

псевдоморфных гетероструктур с каналом  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x > 0.15$ ) на подложках GaAs с барьерами, увеличенными за счет селективного легирования донорами и акцепторами. Особенно полезен он оказался в случае обращенных (в англоязычной литературе инвертированных) гетероструктур [9], которые из практически нерабочих [10] превратились в крайне перспективные [11]. Основная отличительная особенность этих структур, а именно легирование барьера вблизи квантовой ямы со стороны подложки, позволяет максимально приблизить канал транзистора к затвору, тем самым существенно увеличивая крутизну исток–затвор, что особенно важно именно в миллиметровом диапазоне длин волн. Элементарные оценки показывают, что при переходе на обращенную структуру рост максимальной частоты усиления по току составит

$$\frac{\Delta f_t}{f_t} = \frac{C_p}{C_{gs}} \left( \frac{d-h}{d} \right) / \left( 1 + \frac{C_p h}{C_{gs} d} \right),$$

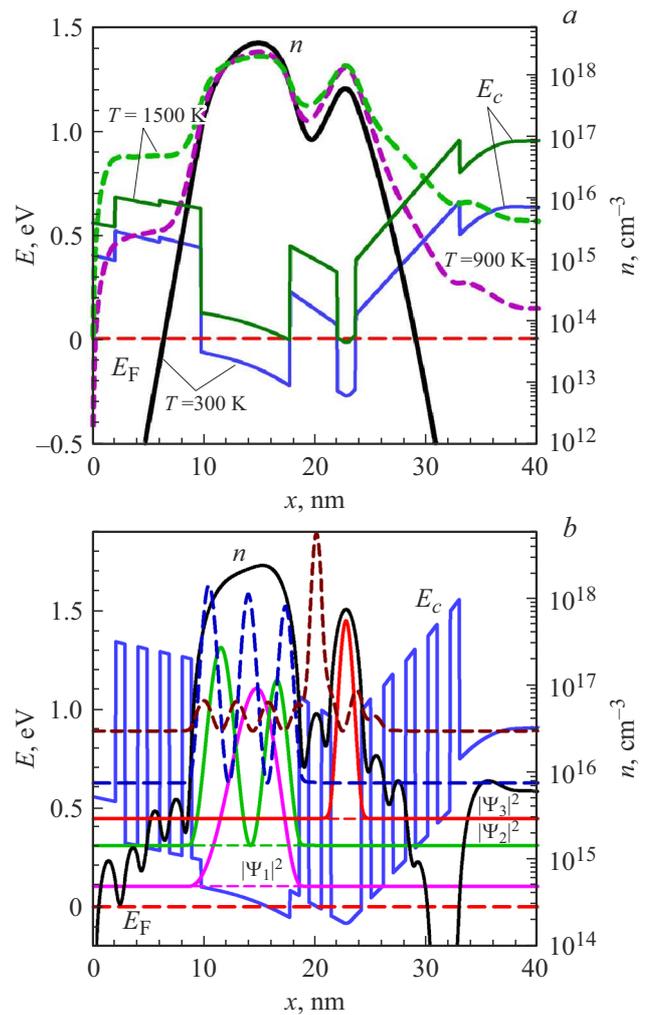
где  $C_{gs}$  — входная емкость затвор–исток „внутреннего“ полевого транзистора на псевдоморфной гетероструктуре с высокой подвижностью электронов (pHEMT),  $C_p$  — паразитная емкость затвора,  $d$  — расстояние от затвора до центра квантовой ямы в pHEMT,  $h$  — расстояние от затвора до центра квантовой ямы в обращенной структуре. Для коротких  $T$ -образных затворов прирост частоты может составить 20–30%, что примерно соответствует росту коэффициента усиления до 2 dB.

Кроме того, такие структуры имеют еще одну потенциальную возможность для улучшения характеристик и в плане мощных приборов коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн могут составить серьезную конкуренцию традиционным метаморфным и InP-согласованным гетероструктурам.

Главная идея селективного донорно-акцепторного (DA) легирования барьеров двойной псевдоморфной гетероструктуры (DpHEMT) — увеличить степень локализации электронов в канале за счет создания резких  $p-i-n$ -потенциальных барьеров с двух сторон канала (гетероструктура DA-DpHEMT) [7]. Эти дополнительные потенциальные барьеры уменьшают поперечный пространственный перенос электронов из канала в широкозонные слои AlGaAs и заметно увеличивают дрейфовую скорость электронов [12] и ее всплеск при влете электронов в область сильного поля под затвором транзистора [11]. Очевидно, что степень локализации электронов в канале сильно зависит как от величины разрыва зон на интерфейсе слоев с различным элементным составом [13], так и от потенциального профиля дополнительных барьеров, сформированных электрическим полем  $p-i-n$ -переходов. Поэтому, если вместо однородного AlGaAs-спейсера между каналом и  $n$ - $\delta$ -слоем и в промежутке между  $\delta$ -слоем и тонким  $p$ -слоем расположить тонкие сверхрешетки AlAs/GaAs с периодом в несколько монослоев, величина разрыва зон на интерфейсах увеличится. Такие сверхрешетки часто называют цифровыми (по аналогии с последовательностью двоичного кода), поскольку их средний элементный состав задается отношением количества монослоев AlAs и GaAs. Для транзисторов важно, что цифровые барьеры могут повысить локализацию горячих электронов в канале.

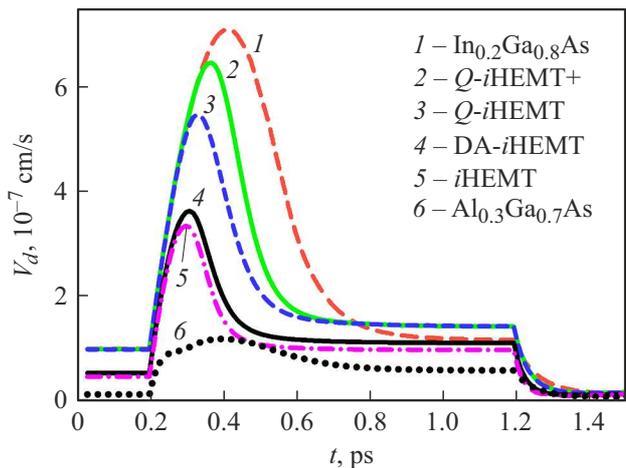
В настоящей работе теоретически исследовалось влияние цифровых барьеров на электронный спектр и транспортные характеристики гетероструктур в сильном электрическом поле. Рассматривалось три типа гетероструктур: обычные обращенные гетероструктуры с одним  $\delta$ -слоем между каналом и подложкой; обращенные гетероструктуры с селективным DA-легированием со стороны подложки; обращенные гетероструктуры с областью DA-легирования, обрамленной цифровыми барьерами. Средняя мольная доля Al в спейсере всех структур была примерно одинакова. Расчет проводился на основе модели, основанной на самосогласованном решении уравнений Шредингера и Пуассона и системы гидродинамических уравнений [11].

На рис. 1 приведены зонные диаграммы и распределения концентрации носителей для структуры с DA-легированием при разных температурах электронного газа (*a*) и в структуре с цифровыми барьерами при температуре электронного газа 1500 К (*b*). Видно, что цифровые барьеры усиливают локализацию электронов в канале. Это в свою очередь ведет к заметно большему (в 1.5–2 раза) всплеску дрейфовой скорости (рис. 2).



**Рис. 1.** Зонные диаграммы и распределения концентрации электронов. *a* — структура с усредненными параметрами слоев, температура электронного газа 300, 900 и 1500 К. *b* — с дополнительными потенциальными барьерами при температуре электронного газа 1500 К (в расчетах учитывалось 20 квантовых уровней).

В структурах с цифровыми барьерами наблюдается (по крайней мере, в расчетах) еще один крайне интересный и полезный для разработки СВЧ-транзисторов эффект: при повышении температуры электронного газа в условиях термодинамического равновесия электроны с ряда уровней квантовой ямы переходят на состояния, локализованные в области цифровых барьеров (рис. 1, *b*). Волновая функция этих локализованных состояний в области канала практически равна нулю. Это означает, что в транзисторе миллиметрового диапазона длин волн за время практически баллистического [14] пролета электронов под затвором они на эти уровни переходить практически не будут. На рис. 2 приведены оценочные расчеты зависимости всплеска дрейфовой скорости электронов от времени с учетом этого эффекта. Уровни, локализованные внутри короткопериодной сверхрешет-



**Рис. 2.** Зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при влете электронов в область сильного поля ( $t < 0.2$  ps,  $E = 1$  kV/cm;  $0.2 < t < 1.2$  ps,  $E = 20$  kV/cm;  $t > 1.2$  ps,  $E = 1$  kV/cm). *i*HEMT — обращенная структура, DA-*i*HEMT — обращенная структура с донорно-акцепторным легированием, Q-*i*HEMT — обращенная структура с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами, Q-*i*HEMT+ — расчет с учетом локализованных состояний.

ки AlAs/GaAs (а в данном случае это третий уровень), в расчетах просто не учитывались. Видно, что в этом случае всплеск заметно увеличивается, приближаясь к теоретическому пределу для данной модели — всплеску дрейфовой скорости в объемном материале канала, т.е. в транзисторах на основе структур с цифровыми барьерами это может быть дополнительным механизмом существенного увеличения их рабочих частот.

Проведенные расчеты в принципе позволяют ответить на основной вопрос работы [15] о том, откуда берется избыточное усиление в транзисторах на основе разработанной ранее гетероструктуры DA-DpHEMT по сравнению с проведенными ранее оценками. С учетом результатов [15] и приведенных выше расчетов простые оценки показывают, что при укорочении затвора транзистора до  $0.05 \mu\text{m}$  оптимизация обращенных структур с DA-легированием и дополнительными цифровыми барьерами может позволить транзисторам работать на частотах вплоть до 300 GHz при сохранении довольно высоких уровней удельных мощностей, в разы превосходящих удельные мощности современных транзисторов с каналами на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с высоким молярным содержанием индия.

Таким образом, полученные результаты показывают, что использование цифровых барьеров является весьма эффективным способом улучшения характеристик транзисторов на основе обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием. Появляется возможность увеличения рабочих частот в 2 раза и соответственно коэффициента усиления в 4 раза относительно значений для обычных DpHEMT-транзисторов

при сохранении неизменными высоких значений других параметров, например удельной мощности. Таким образом, транзисторы на основе обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами составят конкуренцию приборам на основе нитрида галлия и транзисторам с каналом на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с высоким молярным содержанием индия, особенно в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

### 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]. Режим доступа: [https://gems.ece.gatech.edu/PA\\_survey.html](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] V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello, D.P. Nguyen, H. Wang, A. Pham, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **68** (7), 199 (2020). DOI: 10.1109/TMTT.2020.2989792
- [6] X. Mei, W. Yoshida, M. Lange, J. Lee, J. Zhou, P. Liu, K. Leong, A. Zamora, J. Padilla, S. Sarkozy, R. Lai, W.R. Deal, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **36** (4), 327 (2015). DOI: 10.1109/LED.2015.2407193
- [7] В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, А.Б. Соколов, *Письма в ЖТФ*, **38** (17), 84 (2012). [V.M. Lukashin, A.B. Pashkovskii, K.S. Zhuravlev, A.I. Toropov, V.G. Lapin, A.B. Sokolov, *Tech. Phys. Lett.*, **38** (9), 819 (2012). DOI: 10.1134/S1063785012090088].
- [8] 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. Zyryin, 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].
- [9] А.С. Тагер, А.А. Кальфа, *Полевой транзистор*, А.С. 897062 (СССР) (приоритет от 03.09.1980).
- [10] А.М. Крешук, Е.П. Лаурс, С.В. Новиков, И.Г. Савельев, Е.М. Семашко, М.А. Стовповой, А.Я. Шик, *ФТП*, **24** (6), 1145 (1990). [A.M. Kreshchuk, E.P. Laurs, S.V. Novikov, I.G. Savel'ev, E.M. Semashko, M.A. Stovpovoi, A.Ya. Shik, *Sov. Phys. Semicond.*, **24** (6), 726 (1990)].

- [11] А.Б. Пашковский, А.С. Богданов, В.М. Лукашин, С.И. Новиков, *Микроэлектроника*, **49** (3), 210 (2020). DOI: 10.31857/S0544126920030059 [А.В. Pashkovskii, A.S. Bogdanov, V.M. Lukashin, S.I. Novikov, *Russ. Microelectron.*, **49** (3), 195 (2020). DOI: 10.1134/S1063739720030051].
- [12] Д.Ю. Протасов, Д.В. Гуляев, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, Е.В. Ерофеев, К.С. Журавлев, *Письма в ЖТФ*, **44** (6), 77 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.06.45770.17098 [D.Yu. Protasov, D.V. Gulyaev, A.K. Bakarov, A.I. Toropov, E.V. Erofeev, K.S. Zhuravlev, *Tech. Phys. Lett.*, **44** (3), 260 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018030240].
- [13] И.С. Василевский, А.Н. Виниченко, Н.И. Каргин, в сб. *8-я Международ. науч.-практ. конф. по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. Мокеровские чтения* (НИУ МИФИ, 2017), с. 28–29.
- [14] A. Cappy, B. Carnez, R. Fauquembergues, G. Salmer, E. Constant, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **27** (11), 2158 (1980).
- [15] А.В. Pashkovskii, S.A. Bogdanov, А.К. Bakarov, А.В. Grigorenko, К.С. 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