

УДК 538.91:621.3.032

НОВЫЙ ТИП ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ МОЩНЫХ pHEMT-ТРАНЗИСТОРОВ

© К. С. Журавлев¹, Д. Ю. Протасов^{1,2}, А. К. Бакаров¹,
А. И. Торопов¹, Д. В. Гуляев¹, В. Г. Лапин³, В. М. Лукашин³,
А. Б. Пашковский³

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

³Акционерное общество «НПП «Исток» им. А. И. Шокина»,
141190, г. Фрязино Московской области, ул. Вокзальная, 2а
E-mail: protasov@isp.nsc.ru

Представлен новый тип гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs с энергетическими барьерами, сформированными в соседних с каналом InGaAs слоях транзистора AlGaAs, модуляционно-легированных донорами и акцепторами. Высота барьеров, связанных с потенциалом области пространственного заряда в слоях AlGaAs, достигает 0,8 эВ, что позволяет удвоить концентрацию электронов в канале, предотвратить переход горячих электронов, разогретых электрическим полем, в окружающие слои и увеличить примерно в 1,2–1,3 раза их насыщенную скорость дрейфа. В результате удельная выходная СВЧ-мощность транзистора превзошла более чем на 50 % мировой уровень.

Ключевые слова: гетероструктуры pHEMT, донорно-акцепторное легирование, концентрация, подвижность, насыщенная скорость дрейфа, удельная выходная мощность.

DOI: 10.15372/AUT20200504

Введение. Сверхвысокочастотные (СВЧ) транзисторы и монолитные интегральные схемы на основе полупроводников типа A_3B_5 активно востребованы для разработки и производства широкого спектра стационарной и мобильной телекоммуникационной аппаратуры, активных фазированных антенных решёток, высокоскоростной оптоволоконной связи, интеллектуальных систем транспортных средств и других устройств, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн [1]. Развитие современных систем СВЧ-диапазона требует интенсивного совершенствования полупроводниковых технологий мощных транзисторов и интегральных схем.

Псевдоморфные AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) с высокой подвижностью электронов более 30 лет применяются для создания мощных полевых СВЧ-транзисторов (pseudomorphic high electron mobility transistor, pHEMT) [2]. За это время ключевые параметры ГЭС pHEMT значительно улучшены. С помощью двухстороннего легирования увеличена проводимость ГЭС $\sigma = q \times n_{2D} \times \mu$, что достигнуто за счёт повышения как концентрации, так и подвижности двумерного электронного газа (ДЭГ) до $n_{2D} = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $\mu = 7000 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ при комнатной температуре [3]. Для улучшения подвижности добивались резких и гладких гетерограниц в квантовой яме (КЯ) InGaAs/GaAs — канале транзистора [4, 5], увеличивалась до максимума ширина упругонапряжённой КЯ [6], оптимизировалось расстояние между δ -слоями и КЯ [7], использовались спейсеры из короткопериодных сверхрешёток GaAs/AlAs [8, 9], в КЯ добавлялись узкозонные (InAs) и широкозонные (AlAs) вставки [10–14].

Несмотря на эти значительные усилия удельная выходная мощность рНЕМТ (p_{out}) долгое время не могла преодолеть порог 1 Вт/мм в частотном диапазоне 10–30 ГГц [15–20]. Кардинальное увеличение p_{out} произошло после создания в Институте физики полупроводников СО РАН нового типа ГЭС с донорно-акцепторным легированием (donor-acceptor doped рНЕМТ, DA-рНЕМТ) [21] до 1,7 Вт/мм [22]. Такое увеличение p_{out} было получено в результате введения в ГЭС дополнительных потенциальных барьеров, усиливающих локализацию и дрейфовую скорость горячих электронов в КЯ. Это особенно важно для транзисторов, работающих в условиях сильного разогрева электронного газа на участке насыщения выходных вольт-амперных характеристик.

В данной работе представлены результаты численного и экспериментального исследования свойств новых ГЭС и СВЧ-характеристик DA-рНЕМТ-транзисторов.

Конструкция DA-рНЕМТ-гетероструктуры. Выходная СВЧ-мощность транзистора в А-режиме усиления пропорциональна произведению максимально достижимой амплитуды СВЧ-тока стока на максимально достижимую величину амплитуды СВЧ-напряжения «исток — сток» [23]. Поэтому в ГЭС для увеличения выходной СВЧ-мощности транзисторов стремятся повысить проводимость канала. Однако при увеличении n_{2D} ухудшаются характеристики ГЭС. Во-первых, появляется паразитный параллельный канал проводимости в районе δ -слоев. Для обычных рНЕМТ он возникает при концентрации выше $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [24]. Паразитный проводящий канал приводит к нелинейности характеристик транзистора [25]. Во-вторых, рост n_{2D} повышает напряжение отсечки и уменьшает КПД транзистора [23]. Кроме того, недостатком обычных ГЭС рНЕМТ является малая глубина КЯ, равная для типичных КЯ $\text{In}_{0,165}\text{GaAs}/\text{Al}_{0,25}\text{GaAs}$ менее 300 мэВ. В сильном электрическом поле энергия электронов достигает сотен мэВ, становится сравнимой и даже превышает глубину КЯ. Вследствие этого происходит делокализация горячих электронов из КЯ в окружающие её широкозонные слои AlGaAs — перенос в реальном пространстве [26]. Дрейфовая скорость горячих электронов в AlGaAs мала из-за большой эффективной массы и рассеяния на потенциале донорной примеси.

Для преодоления этих недостатков в [21, 22] предложено создать потенциальные барьеры, усиливающие локализацию ДЭГ. Эти барьеры были сформированы потенциалом области пространственного заряда в слоях AlGaAs, легированных донорами и акцепторами. Такое решение требует большой концентрации доноров, так как их часть участвует в формировании барьера, а оставшиеся доноры поставляют электроны в КЯ. Об увеличении потенциального барьера между КЯ гетероструктуры и подложкой за счёт легирования части буферного слоя акцепторами было известно из [27–29]. При этом в ГЭС рНЕМТ наблюдались увеличение концентрации ДЭГ и возрастание на 20–35 % насыщенной скорости дрейфа. Однако вследствие большой толщины нелегированного слоя между слоями доноров и акцепторов величина встроенного электрического поля достаточно мала и потенциальный барьер получался плавным. Предложенные нами ГЭС DA-рНЕМТ сильно легируются акцепторами ($5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и донорами ($(7-10) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$), толщина нелегированного слоя между легированными областями мала (4–7 нм), и высота барьеров достигает 0,6–0,8 эВ.

Типичная конструкция ГЭС DA-рНЕМТ с двухсторонним донорно-акцепторным легированием барьеров (без контактного n^+ -слоя) приведена на рис. 1, а.

Характеристики гетероструктур DA-рНЕМТ.

Проводимость гетероструктур DA-рНЕМТ. Измерения магнитополевых зависимостей эффекта Холла и магнитосопротивления в ГЭС рНЕМТ и DA-рНЕМТ показывают, что n_{2D} в DA-рНЕМТ, по крайней мере, вдвое превышает n_{2D} для ГЭС рНЕМТ [30]. Величина положительного магнитосопротивления для ГЭС DA-рНЕМТ на порядок меньше, чем для обычной ГЭС рНЕМТ. Это указывает на уменьшение концентрации электронов в барьерных слоях, которые формируют канал параллельной проводимости.

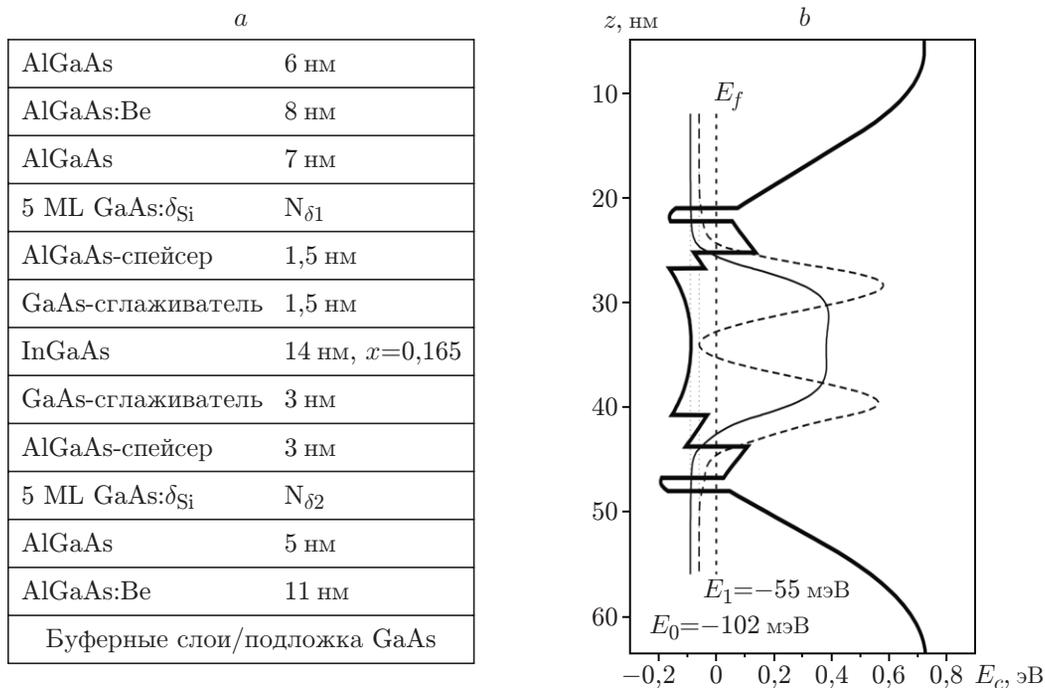


Рис. 1. Гетероструктура DA-pHEMT: *a* — конструкция гетероструктуры; *b* — рассчитанный потенциальный профиль и плотности вероятности нахождения электронов для двух заполненных подзон (сплошная тонкая кривая — первая подзона, пунктирная кривая — вторая подзона) размерного квантования

Для лучшей иллюстрации наличия/отсутствия параллельной проводимости на рис. 2 представлены электронные части спектров подвижности ГЭС pHEMT и DA-pHEMT, рассчитанные по измеренным магнитополевым зависимостям эффекта Холла и магнитосопротивления. В этих спектрах электроны с различной подвижностью формируют отдельные пики, амплитуда пиков показывает проводимость данных электронов. Как видно на рисунке, в спектре подвижности обычной ГЭС pHEMT присутствуют два пика, связанных с ДЭГ и с параллельной проводимостью в δ -слое, тогда как в спектрах ГЭС DA-pHEMT наблюдается только один пик.

Механизмы рассеяния ДЭГ в гетероструктурах DA-pHEMT. В ГЭС DA-pHEMT заполнены две подзоны размерного квантования (см. рис. 1, *b*). Поэтому для расчёта подвижности ДЭГ в исследуемых образцах необходимо учитывать межподзонное рассеяние. В этом случае время релаксации носителей заряда по импульсу при упругом рассеянии в каждой подзоне размерного квантования выражается через компоненты тензора рассеяния K и положения энергетических уровней подзон E_i ($i = 0, 1$) относительно уровня Ферми E_F [31]. Проведённый в [32] расчёт подвижности ДЭГ в ГЭС DA-pHEMT показал, что при $T = 77$ К существенным является только рассеяние на заряженных донорах, на деформационном потенциале и на неоднородностях сплава. Остальные механизмы (рассеяние на заряженных акцепторах, пьезоэлектрическое рассеяние, рассеяние на шероховатостях гетерограницы) достаточно слабы, их вклад в результирующую подвижность меньше неоднозначности, возникающей при выборе параметров более сильных механизмов рассеяния (величин деформационного и сплавного потенциалов). Вследствие большой концентрации доноров подвижность ДЭГ сильно зависит от степени уширения δ -слоёв, вызванной диффузией и сегрегацией примеси [33]. Расщепление каждого из δ -слоёв на два: ближний к КЯ создаёт ДЭГ, а второй служит для компенсации акцепторов, позволило по-

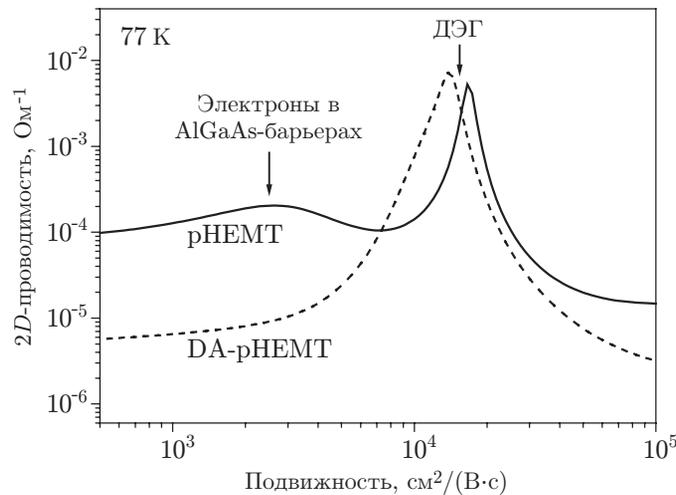


Рис. 2. Электронная часть спектров подвижности для гетероструктур рНЕМТ (сплошная кривая) и DA-рНЕМТ (штриховая) при 77 К [30]

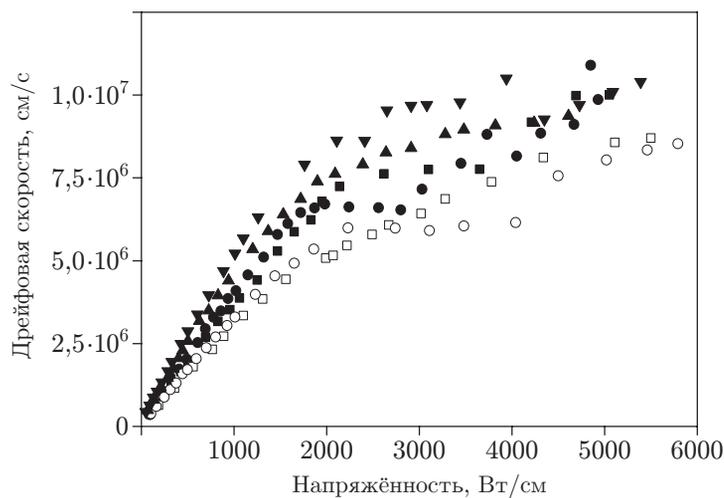


Рис. 3. Полевые зависимости дрейфовой скорости для рНЕМТ (□, ○), DA-рНЕМТ (■, ●) и DA-рНЕМТ с расщеплёнными дельта-слоями (▲, ▼)

лучить подвижность выше $6500 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ при концентрации $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ для комнатной температуры.

Насыщенная скорость дрейфа в сильных электрических полях. Характеристики СВЧ-транзистора определяются не только проводимостью канала ГЭС в слабом электрическом поле, но и насыщенной скоростью дрейфа в сильном электрическом поле. На основании анализа малосигнальных характеристик СВЧ-транзистора было показано, что насыщенная скорость дрейфа $v_{\text{нас}}$ в DA-рНЕМТ больше таковой для ГЭС рНЕМТ в 1,4–1,6 раза [34]. Непосредственно полевые зависимости дрейфовой скорости для ГЭС рНЕМТ и DA-рНЕМТ были измерены методом проводимости. Полученные результаты представлены на рис. 3.

На рис. 3 видно, что насыщение дрейфовой скорости $v_{\text{нас}}$ в исследуемых образцах начинается при полях выше 2–3 кВ/см. Величина $v_{\text{нас}}$ в рНЕМТ лежит около $8,6 \cdot 10^6 \text{ см/с}$, тогда как в DA-рНЕМТ она в 1,2–1,3 раза выше и близка к $1,1 \cdot 10^7 \text{ см/с}$. Заметим, что максимальная $v_{\text{нас}}$ наблюдается в DA-рНЕМТ с расщеплёнными δ -слоями.

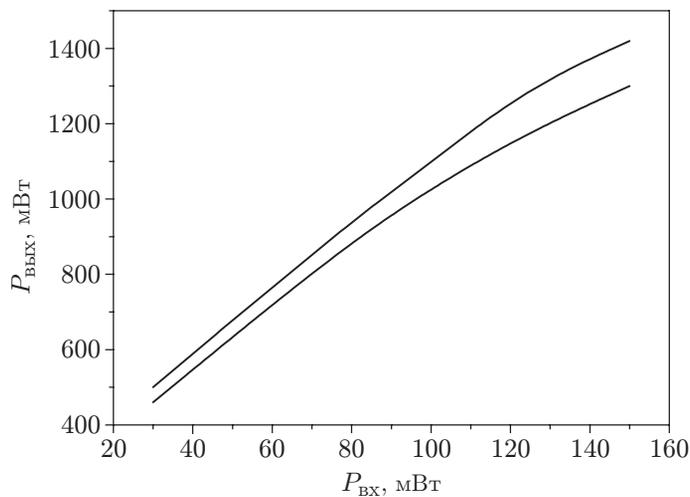


Рис. 4. Мощностные характеристики транзисторов партии DA-pHEMT, измеренные в импульсном режиме

В спектрах электролюминесценции ГЭС DA-pHEMT отсутствуют полосы, связанные с рекомбинацией в барьерах КЯ, а интенсивность электролюминесценции КЯ не насыщается при увеличении напряжённости электрического поля. Это свидетельствует о подавлении переноса горячих электронов из КЯ в окружающие её барьерные слои, с чем и связано увеличение насыщенной скорости дрейфа.

Характеристики транзисторов DA-pHEMT. Введение акцепторных слоёв в состав ГЭС pHEMT потребовало усовершенствования технологии изготовления транзисторов [35]. Была разработана оригинальная технология изготовления омических контактов, заключающаяся в последовательном нанесении в одном технологическом процессе слоёв Ni/Au:Ge/LaB₆/Au. Удельное электрическое сопротивление контактов составило 10^{-7} Ом·см² при высокой термостабильности. Затвор транзистора DA-pHEMT формировался по оригинальной технологии и имел Г-образную форму с перекладной в сторону истока длиной в 2–3 раза меньше, чем разрешение используемого литографического оборудования. Форма затвора позволила увеличить напряжение пробоя «затвор — сток» и величину максимально достижимого тока стока на единицу ширины затвора при подаче положительного потенциала на затвор. Кроме того, обеспечивается возрастание рабочей частоты транзистора.

Мощностные характеристики транзисторов с длиной и шириной затвора 0,4 мкм и 0,8 мкм соответственно показаны на рис. 4. Характеристики были измерены в импульсном режиме с длиной импульса 10 нс и скважностью 4. На частоте 10 ГГц в импульсном режиме удельная выходная мощность экспериментальных образцов DA-pHEMT транзисторов составила более 1,7 Вт/мм при коэффициенте усиления более 9,5 дБ и КПД до 50 %.

Заключение. В данной работе продемонстрирована концепция повышения пространственной локализации электронов в квантовых ямах псевдоморфных транзисторных гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs с помощью модуляционного донорно-акцепторного легирования. Увеличение глубины квантовых ям до 0,8 эВ (при типичной глубине 0,3 эВ) позволило удвоить концентрацию и увеличить в 1,3 раза насыщенную скорость дрейфа электронов в сильном электрическом поле. СВЧ-транзисторы, изготовленные на основе предложенных гетероструктур, показали на частоте 10 ГГц удельную выходную мощность 1,7 Вт/мм, что на 50 % выше мирового уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоус А. И., Мерданов М. К., Шведов С. В. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия. Кн. 2. М.: Техносфера, 2016. 728 с.
2. Ketterson A., Moloney M., Masselink W. T. et al. High transconductance InGaAs/AlGaAs pseudomorphic modulation-doped field-effect transistors // IEEE Electron Device Lett. 1985. **6**, N 12. P. 628–630.
3. Kudo M., Mishima T., Tanimoto T., Washima M. Single and double δ -doped $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ pseudomorphic heterostructures grown by molecular beam epitaxy // Jpn. Journ. Appl. Phys. 1994. **33**. P. 971–975.
4. Chao K.-J., Liu N., Shih C.-K. et al. Factors influencing the interfacial roughness of InGaAs/GaAs heterostructures: A scanning tunneling microscopy study // Appl. Phys. Lett. 1999. **75**, N 12. P. 1703–1705.
5. Toyoshima H., Niwa T., Yamazaki J., Okamoto A. Suppression of In surface segregation and growth of modulation-doped N-AlGaAs/InGaAs/GaAs structures with a high In composition by molecular-beam epitaxy // Journ. Appl. Phys. 1994. **75**, N 8. P. 3908–3913.
6. Chen Y. C., Bhattacharya P. K. Determination of critical layer thickness and strain tensor in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum-well structures by x-ray diffraction // Journ. Appl. Phys. 1993. **73**, N 11. P. 7389–7394.
7. Jogai B. Selfconsistent kp band structure calculation for AlGaAs/InGaAs pseudomorphic high electron mobility transistors // Appl. Phys. Lett. 1995. **66**, N 4. P. 2316–2323.
8. Inoue K., Sakaki H., Yoshino J., Yoshioka Y. Effects of substrate temperatures on the doping profiles of Si in selectively doped AlGaAs/GaAs/AlGaAs double-heterojunction structures // Appl. Phys. Lett. 1985. **46**, N 10. P. 973–975.
9. Виниченко А. Н., Гладков В. П., Каргин Н. И. и др. Увеличение подвижности электронов в НЕМТ гетероструктурах с составным спейсером, содержащим нанослой AlAs // Физика и техника полупроводников. 2014. **48**, № 2. С. 1660–1665.
10. Požela J., Juciene V., Požela K. J. Confined electron-optical phonon scattering rates in 2D structures containing electron and phonon walls // Semicond. Sci. Technol. 1995. **10**. P. 1076–1083.
11. Мокеров В. Г., Галиев Г. Б., Пожела Ю. и др. Подвижность электронов в квантовой яме AlGaAs/GaAs/AlGaAs // Физика и техника полупроводников. 2002. **36**, № 6. С. 713–717.
12. Пожела Ю. К., Мокеров В. Г. Большое повышение максимальной дрейфовой скорости электронов в канале полевого транзистора // Физика и техника полупроводников. 2006. **40**, № 3. С. 362–366.
13. Мокеров В., Пожела Ю., Пожела К. и др. Гетероструктурный транзистор на квантовых точках с повышенной максимальной дрейфовой скоростью электронов // Физика и техника полупроводников. 2006. **40**, № 3. С. 367–371.
14. Пожела Ю., Пожела К., Юцене В. И. и др. Повышение подвижности электронов в двухбарьерной гетероструктуре AlGaAs/GaAs/AlGaAs при введении в квантовую яму GaAs тонких InAs-барьеров для полярных оптических фононов // Физика и техника полупроводников. 2007. **41**, № 12. С. 1460–1465.
15. Chu C. K., Huang H. K., Liu H. Z. et al. A fully matched 8W X-band PHEMT MMIC high power amplifier // Proc. of IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Monterey, USA, 24–27 Oct., 2004. P. 137–140.
16. Lyons M. R., Grondahl C. D., Daoud S. M. Design of low-cost 4W & 6W MMIC high power amplifiers for Ka-band modules // Proc. of IEEE MTT-S Intern. Microwave Symposium Dig. Fort Worth, USA, 6–11 June, 2004. Vol. 3. P. 1673–1676.

17. **Amasuga H., Goto S., Shiga T. et al.** A high power density TaN/Au T-gate pHEMT with high humidity resistance for Ka-Band applications // Proc. of IEEE MTT-S Intern. Microwave Symposium Dig. Long Beach, USA, 17 June, 2005. P. 831–834.
18. **Lin C. H., Liu H. Z., Chu C. K. et al.** A fully matched Ku-band 9W PHEMT MMIC high power amplifier // Proc. of IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. San Antonio, USA, 12–15 Nov., 2006. P. 165–168.
19. **Dumka D. C., Kao M. Y., Beam E. et al.** Development of Ka-Band GaAs pHEMTs with Output Power over 1 W/mm // Proc. of IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Monterey, USA, 3–6 Oct., 2010. P. 1–4.
20. **Cho S.-J., Wang C., Kim N.-Yo.** High power density AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMTs using an optimized manufacturing process for Ka-band applications // Microelectron. Eng. 2014. **113**. P. 11–19.
21. **Лукашин В. М., Пашковский А. Б., Журавлев К. С. и др.** Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов // Письма в ЖТФ. 2012. **38**, № 17. С. 84–89.
22. **Лукашин В. М., Пашковский А. Б., Журавлев К. С. и др.** Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием // Физика и техника полупроводников. 2014. **48**, № 5. С. 684–692.
23. **Kushner L. J.** Estimating power amplifier large signal gain // Microwave Journ. 1990. **33**, Iss. 6. P. 87–102.
24. **Васильевский И. С., Галиев Г. Б., Климов Е. А. и др.** Электрофизические и структурные свойства двусторонне delta-легированных PHEMT-гетероструктур на основе AlGaAs/InGaAs/AlGaAs // Физика и техника полупроводников. 2008. **42**, № 9. С. 1102–1109.
25. **Chien F.-T., Liao C.-N., Yin J.-M. et al.** Device linearity improvement of In_{0.49}Ga_{0.51}P/In_{0.15}Ga_{0.85}As doped-channel FETs with a metal plug alloy process // Semicond. Sci. Technol. 2008. **23**. 035009.
26. **Gribnikov Z. S., Hess K., Kosinovsky A. G.** Nonlocal and nonlinear transport in semiconductors: Real-space transfer effects // Appl. Phys. Rev. 1995. **77**, Iss. 4. P. 1337–1373.
27. **Anderson S. F., Schaff W. J., Tasker P. J. et al.** The effect of buried p-doped layers on the current saturation mechanism in AlGaAs/InGaAs/GaAs MODFET's // IEEE Trans. Electr. Dev. 1987. **ED-34**, Iss. 11. P. 2357.
28. **Chen Y. K., Radulescu D. C., Lepore A. N. et al.** Enhancement of 2DEG density in GaAs/InGaAs/AlGaAs double heterojunction power MODFET structures by buried superlattice and buried p⁺-GaAs buffer layers // IEEE Trans. Electr. Dev. 1987. **34**, Iss. 11. P. 2356–2357.
29. **Chang Y.-C., Hailin L., Wang Y. et al.** A novel GaAs/InGaAs/AlGaAs structure of modulation-doped field-effect transistors with high transconductances // Chin. Phys. Lett. 2002. **19**, Iss. 4. P. 588–590.
30. **Gulyaev D. V., Zhuravlev K. S., Bakarov A. K. et al.** Influence of the additional p⁺-doped layers on the properties of AlGaAs/InGaAs/AlGaAs heterostructures for high power SHF transistors // Journ. Phys. D. Appl. Phys. 2016. **49**. 095108.
31. **Fletcher R., Zaremba E., D'Iorio M. et al.** Persistent photoconductivity and two-band effects in GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterojunctions // Phys. Rev. B. 1990. **41**, Iss. 15. P. 10649–10666.
32. **Protasov D. Yu., Zhuravlev K. S.** The influence of impurity profiles on mobility of two-dimensional electron gas in AlGaAs/InGaAs/GaAs heterostructures modulation-doped by donors and acceptors // Solid State Electron. 2017. **129**. P. 66–72.
33. **Протасов Д. Ю., Bakarov A. K., Торопов А. И. и др.** Подвижность двумерного электронного газа в DA-pHEMT гетероструктурах с различной шириной профиля δ-n-слоёв // Физика и техника полупроводников. 2018. **52**, вып. 1. С. 48–56.

34. **Борисов А. А., Журавлев К. С., Зырин С. С. и др.** Исследование средней дрейфовой скорости электронов в рНЕМТ транзисторах // Письма в ЖТФ. 2016. **42**, № 16. С. 41–47.
35. **Лапин В. Г.** Перспективы развития и применения DA-рНЕМТ в СВЧ МИС // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2017. Вып. 1. С. 26–44.

Поступила в редакцию 29.06.2020

После доработки 20.07.2020

Принята к публикации 29.07.2020
