

08.3;13.4

Гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs для ключевых рНЕМТ-транзисторов

© Д.Ю. Протасов^{1,2}, Д.В. Дмитриев¹, К.С. Журавлев¹, Г.И. Айзенштат³, А.Ю. Ющенко³,
А.Б. Пашковский⁴

¹ Институт физики полупроводников им. акад. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

³ Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов, Томск, Россия

⁴ АО „НПП „Исток“ им. Шокина“, Фрязино, Московская обл., Россия

E-mail: protasov@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 26 мая 2022 г.

В окончательной редакции 14 июля 2022 г.

Принято к публикации 16 июля 2022 г.

Для улучшения параметров ключевых СВЧ-транзисторов оптимизированы гетероструктуры рНЕМТ. Оптимизированные гетероструктуры имеют одностороннее δ -легирование на уровне $6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ и спейсер AlAs/GaAs. На их основе изготовлены интегральные схемы двухпозиционных рНЕМТ-переключателей с длиной и шириной затвора 0.5 и 100 μm соответственно. Полученные транзисторы имеют следующие параметры: $g_{\text{max}} = 400 \text{ mS/mm}$, ток насыщения $I_D = 380 \text{ mA/mm}$, сопротивление во включенном состоянии $1.0 \Omega \cdot \text{mm}$, емкость в выключенном состоянии 0.37 pF/mm. Параметры переключателей на частоте 20 GHz следующие: вносимые потери -2.2 dB , потери запираания -56 dB , возвратные потери -11.7 dB , линейность $P_{1 \text{ dB}} = 21 \text{ dBm}$ и $\text{IP}_3 = 40 \text{ dBm}$.

Ключевые слова: рНЕМТ, одностороннее легирование, конструкция спейсера, минимальное сопротивление, ключевой транзистор.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.17.53282.19260

Вследствие интенсивного развития систем обнаружения, связи и позиционирования, а также из-за возросших требований к военным и гражданским высокочастотным устройствам необходимо совершенствование твердотельной элементной компонентной базы сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники. Одним из основных компонентов такой базы являются монолитные интегральные схемы (МИС) СВЧ-переключателей, изготовленные на основе гетероструктур рНЕМТ (pseudomorphic high electron mobility transistor) [1]. К параметрам ключевых транзисторов рНЕМТ, на основе которых строятся данные схемы, предъявляется целый ряд требований, главные из которых заключаются в обеспечении минимального сопротивления транзистора в открытом состоянии R_{on} и минимальной емкости в закрытом состоянии C_{off} .

С использованием математического моделирования было показано, что лучшие характеристики переключателей могут быть получены на транзисторах, где концентрация доноров в ближнем к поверхности гетероструктуры δ -слое в 4–6 раз выше, чем в нижнем δ -слое [2,3]. По сравнению с гетероструктурами с двухсторонним δ -легированием в гетероструктурах с одним ближним к поверхности δ -слоем максимум электронной плотности отодвигается от инвертированной InGaAs/AlGaAs-гетерограницы, которая имеет большую шероховатость, чем прямая AlGaAs/InGaAs-гетерограница [4]. В результате подвижность электронов возрастает, а сопротивление гетероструктуры при сравнимой концентрации электронов уменьшается [5]. Все это дает

основание предположить, что для изготовления ключевых транзисторов можно использовать гетероструктуры с односторонним δ -легированием.

Для дальнейшего уменьшения сопротивления R_{on} необходимо варьировать концентрацию электронов, повышая концентрацию донорной примеси. Однако при концентрации электронов выше $(1.5–1.8) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ их подвижность снижается [6]. Такая зависимость подвижности электронов может приводить к уменьшению проводимости. Поэтому необходимо исследовать зависимость проводимости односторонне легированных гетероструктур рНЕМТ от концентрации легирующей примеси, превышающей $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

В настоящей работе проведено исследование влияния как способа и уровня легирования, так и конструкции спейсерного слоя на сопротивление рНЕМТ-гетероструктуры с односторонним легированием. На основе гетероструктур с оптимальным значением сопротивления изготовлены макеты интегральных схем двухпозиционных рНЕМТ-переключателей и измерены их параметры. Показано, что оптимальными гетероструктурами для изготовления ключевых транзисторов являются гетероструктуры со спейсером в виде короткопериодной сверхрешетки AlAs/GaAs и с δ -легированием на уровне $6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Изготовленные на основе таких гетероструктур ключевые транзисторы не уступают по параметрам аналогам, выполненным на гетероструктурах с двухсторонним легированием.

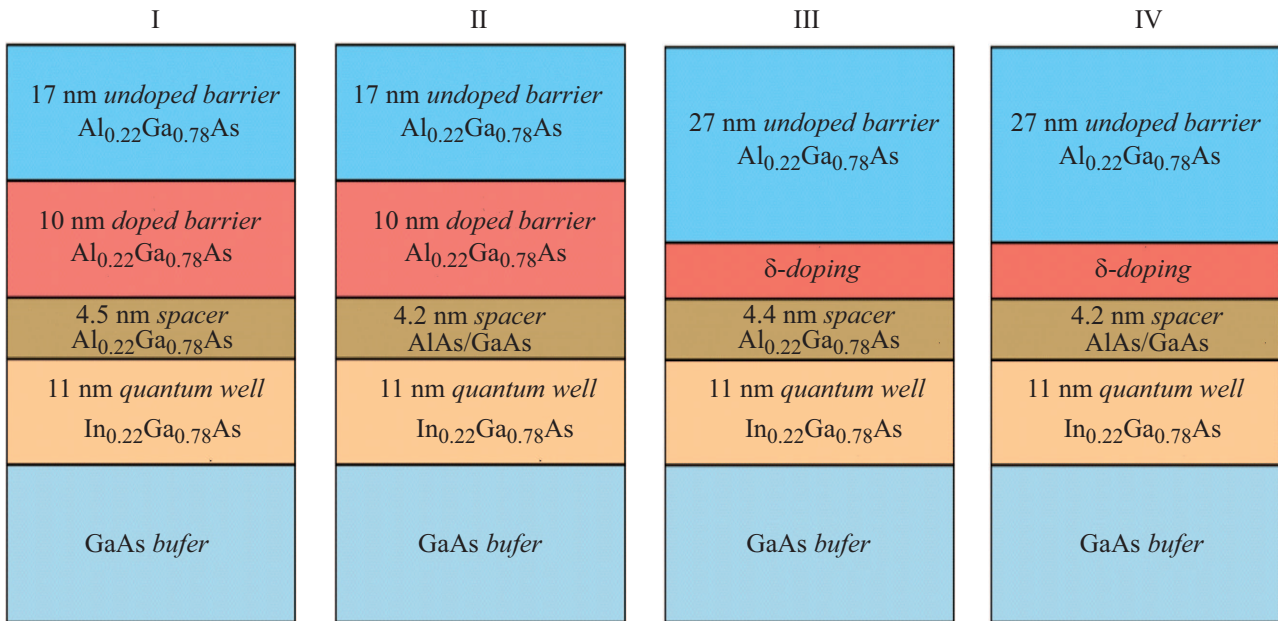


Рис. 1. Варьирование конструкции спейсера и способа легирования гетероструктур серий I–IV.

Гетероструктуры для исследований были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующих подложках GaAs. Для получения атомарно-гладкой поверхности температура роста буферного слоя GaAs варьировалась в пределах 550–600°C. Для роста слоя InGaAs температура понижалась до 510°C. При росте спейсера температура подложки повышалась до 530–550°C, при этой температуре проводилось δ-легирование кремнием. Слои AlGaAs выращивались при температуре 620°C. Было исследовано четыре серии гетероструктур, различающихся способом легирования и конструкцией спейсера (рис. 1). Сверхрешетка AlAs/GaAs была выполнена в следующем виде: 3 моно-слоя (ML) GaAs/3 ML AlAs/3 ML GaAs/3 ML AlAs/2.5 ML GaAs (общая толщина 4.2 nm). Среднее молярное содержание алюминия в таком спейсере составило 0.59, что почти вдвое превышает молярное содержание алюминия в спейсере AlGaAs.

Слоевая концентрация атомов кремния (N_{Si}) в гетероструктурах с модулированным легированием задавалась потоком кремния, который определяется температурой источника кремния, а в гетероструктурах с δ-легированием — путем увеличения времени осаждения кремния при неизменной температуре источника. Величина N_{Si} варьировалась от $2.5 \cdot 10^{12}$ до $9.0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Перед ростом гетероструктур определялись зависимости концентрации электронов проводимости от температуры источника кремния в слоях GaAs и AlGaAs. Далее эти зависимости использовались для расчета концентрации атомов кремния в выращенных гетероструктурах. Подвижность и концентрация электронов, а также удельное сопротивление определялись по измерениям эффекта Холла и сопротивления методом Ван дер Пау на образцах размером $5 \times 5 \text{ mm}$ при значе-

нии индукции магнитного поля 0.2 Т. Погрешность определенных значений концентрации и подвижности электронов обусловлена методической погрешностью метода Ван дер Пау. Для используемых в настоящей работе квадратных образцов с малыми омическими контактами на уголках (отношение характерных размеров контактов к размеру образца приблизительно равно 1:5) погрешность равна 2.5% для измерения удельного сопротивления и 10% для измерения холловского напряжения [7].

Измеренные зависимости удельного сопротивления гетероструктур от концентрации легирующей примеси приведены на рис. 2. Для уменьшения сопротивления

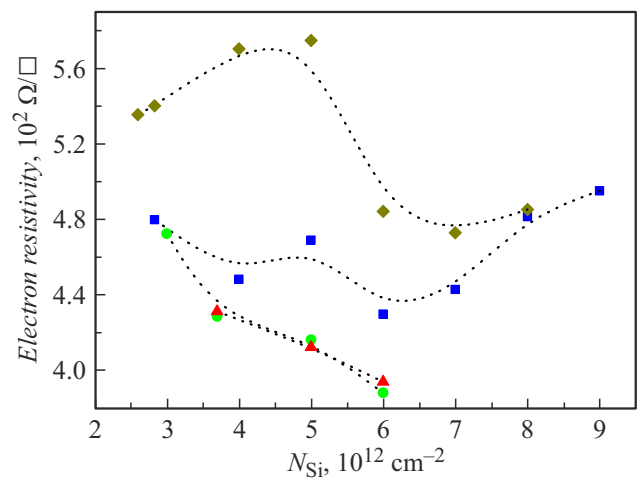


Рис. 2. Изменение удельного сопротивления гетероструктур при увеличении слоевой концентрации доноров N_{Si} для разных типов гетероструктур. Круг — серия I, треугольник — серия II, ромб — серия III, квадрат — серия IV. Линии проведены для наглядности.

Таблица 1. Значения концентрации и подвижности электронов в гетероструктурах серий I–IV при слоевой концентрации доноров $N_{Si} = 6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

Параметр	Серия			
	I	II	III	IV
Концентрация, 10^{12} cm^{-2}	2.6	2.4	5.9	4.6
Подвижность, $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	6100	6480	2190	3150

R_{on} необходимо использовать гетероструктуры с минимальным удельным сопротивлением. Удельное сопротивление зависит от концентрации доноров немонотонно, наименьшие значения сопротивления для большинства серий достигаются при $N_{Si} = 6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. В табл. 1 приведены подвижности и концентрации электронов, измеренные в гетероструктурах с этим уровнем легирования.

Для гетероструктур серий II и IV со сверхрешеточным спейсером наблюдается увеличение подвижности электронов относительно подвижности электронов в сериях I и III соответственно. Наоборот, при использовании сверхрешеточного спейсера концентрация электронов снижается. Минимальное удельное сопротивление ρ наблюдается для гетероструктур с модулированным легированием (серии I и II) за счет более высокой подвижности электронов. Для этих серий ρ практически одинаково (с погрешностью не более 1.5%).

При выборе типа гетероструктур для изготовления ключевых транзисторов необходимо найти компромиссное решение между сопротивлением R_{on} и другими параметрами транзистора, в частности крутизной проходной характеристики. Для оценки управляемости концентрацией электронов в канале транзистора на основе гетероструктур с модулированным и δ -легированием были рассчитаны потенциальные диаграммы и волновые функции для гетероструктур серий II и IV. Расчет показал, что для гетероструктуры с модулированным легированием при напряжении -1.5 V в области доноров сохраняется сравнимая с концентрацией двумерного электронного газа n_{2D} концентрация электронов, тогда как в структуре с δ -легированием этот канал проводимости почти полностью опустошен. Следовательно, ток в гетероструктуре серии II будет медленнее уменьшаться при увеличении смещения на затворе, чем в гетероструктуре серии IV. Для оценки крутизны проходной характеристики были рассчитаны зависимости производной $\partial n_{2D} / \partial U_g$ от напряжения на затворе в диапазоне от -0.7 до -0.3 V . Расчет показал, что в средней точке этого диапазона -0.5 V значение производной $\partial n_{2D} / \partial U_g$ составляет $1.5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$ для гетероструктуры II и $4.5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{V}^{-1}$ для гетероструктуры IV. Поскольку крутизна пропорциональна произведению $\partial n_{2D} / \partial U_g$ на подвижность электронов, даже с учетом вдвое меньшей подвижности электронов, крутизна проходной характеристики будет

больше для последней серии гетероструктур. Это явилось основанием для выбора гетероструктур серии IV для изготовления транзисторов.

МИС двухпозиционных переключателей были изготовлены по рНЕМТ-технологии с проектной нормой $0.5 \mu\text{m}$. На рис. 3 показана типичная вольт-амперная характеристика тестового ключевого транзистора с шириной затвора, изготовленного в едином процессе с МИС переключателя, $w = 100 \mu\text{m}$. Для создания тестовых транзисторов использовались гетероструктуры типа IV с концентрацией доноров в δ -слое $N_{Si} = 6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ и толщиной барьерного слоя $d = 25 \text{ nm}$. В дополнение к слоям, показанным на рис. 1, эти гетероструктуры имели поверхностный n^+ -слой для уменьшения контактного сопротивления. Сопротивление транзистора в открытом состоянии равнялось $R_{on} = 1.0 \Omega \cdot \text{mm}$, а проходная емкость в закрытом состоянии $C_{off} = 0.37 \text{ pF/mm}$. Максимальная крутизна транзистора равнялась $g_{max} = 400 \text{ mS/mm}$, максимальная величина тока насыщения $I_D = 380 \text{ mA/mm}$, напряжение отсечки $U_{th} \geq -1.3 \text{ V}$.

Частотный диапазон МИС двухпозиционных переключателей составлял $0\text{--}20 \text{ GHz}$, вносимые потери в этом частотном диапазоне по абсолютной величине не превышали 2.2 dB , а максимальное значение возвратных потерь по абсолютной величине составило 11.7 dB . Потери запираания по абсолютной величине были не менее 56 dB , верхняя граница линейности по входу при компрессии коэффициента передачи на 1 dB — не менее $P_{1 \text{ dB}} = 21 \text{ dBm}$, точка пересечения интермодуляционных составляющих третьего порядка по входу — не менее $IP_3 = 40 \text{ dBm}$. Полученные параметры ключевых транзисторов МИС приведены в табл. 2. Как можно видеть, в целом они сопоставимы с параметрами аналогичных ключевых транзисторов с длиной затвора $0.5 \mu\text{m}$, представленных в работах [8,9].

В заключение отметим, что в работе представлены результаты оптимизации конструкции рНЕМТ-гетеро-

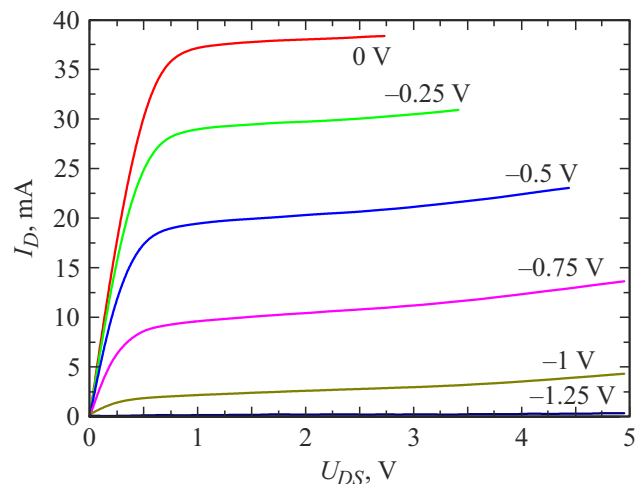


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика тестового транзистора ($w = 100 \mu\text{m}$).

Таблица 2. Параметры МИС двухпозиционных переключателей на pHEMT-транзисторах

Параметр	Наст. раб.	[8]	[9]
g_{\max} , mS/mm	400	250	280
$R_{on} \cdot C_{off}$, fs	370	272	360
Вносимые потери, dB	-2.2	-0.85	-1.7
Потери запираания, dB	-56	-31.5	-40
Возвратные потери, dB	-11.7	-12.7	-
$P_{1\text{ dB}}$, dBm	21	25	30
ПП ₃ , dBm	40	42	-

- [8] Q. Xiao, G. Samiotes, T. Galluccio, B. Rizzi, in Proc. 39th Eur. Microwave Conf. (IEEE, 2009), p. 1673. DOI: 10.23919/EUMC.2009.5296295
- [9] J.-K. Mun, J.-H. Oh, H.-K. Sung, C. Wang, Solid-State Electron., **114**, 121 (2015). DOI: 10.1016/j.sse.2015.09.007

структуры для ключевых транзисторов. Удельное сопротивление всех типов гетероструктур имеет минимум при концентрации легирующей примеси $(6-7) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Удельное сопротивление гетероструктур со сверхрешеточным спейсером меньше, чем для гетероструктур с объемным спейсером. Несмотря на то что сопротивление гетероструктур с модулированным легированием немного меньше (на 9%), чем сопротивление гетероструктур с δ -легированием, последние из-за большей крутизны проходной характеристики более предпочтительны для изготовления высокочастотных ключевых транзисторов.

На основе гетероструктур с односторонним δ -легированием и сверхрешеточным спейсером были изготовлены монолитные интегральные схемы переключателей с параметрами, в целом не уступающими параметрам аналогов, изготовленных на основе более сложных гетероструктур с двухсторонним легированием.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Zhao, W.-F. Liang, J.-Y. Zhou, X. Jiang, IEEE Microwave Wireless Comp. Lett., **27** (5), 485 (2017). DOI: 10.1109/LMWC.2017.2690834
- [2] J.-H. Oh, J.K. Mun, J.-K. Rhee, S.-D. Kim, ETRI J., **31** (3), 342 (2009). DOI: 10.4218/etrij.09.0208.0348
- [3] J.K. Mun, H.G. Ji, H. Ahn, H. Kim, C.-O. Park, Semicond. Sci. Technol., **20** (8), 677 (2005). DOI: 10.1088/0268-1242/20/8/005
- [4] T. Baba, T. Mizutani, M. Ogawa, J. Appl. Phys., **59** (2), 526 (1986). DOI: 10.1063/1.336663
- [5] D.Yu. Protasov, K.S. Zhuravlev, Solid-State Electron., **129**, 66 (2017). DOI: 10.1016/j.sse.2016.12.013
- [6] Д.А. Сафонов, А.Н. Виниченко, Н.И. Каргин, И.С. Васильевский, Письма в ЖТФ, **44** (4), 34 (2018). DOI: 10.21883/PJTf.2018.04.45636.16915 [D.A. Safonov, A.N. Vinichenko, N.I. Kargin, I.S. Vasil'evskii, Tech. Phys. Lett., **44** (2), 145 (2018). DOI: 10.1134/S106378501802027X].
- [7] R. Chwang, B.J. Smith, C.R. Crowell, Solid-State Electron., **17** (12), 1217 (1974). DOI: 10.1016/0038-1101(74)90001-X