

УСТРОЙСТВА И ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ
И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

УДК 539.23; 621.382.323

ТРАНЗИСТОРЫ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ НА
ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НИТРИДА ГАЛЛИЯ ДЛЯ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

© 2022 г. И. С. Езубченко^{1,*}, Е. М. Колобкова¹, А. А. Андреев¹, М. Я. Черных¹, Ю. В. Грищенко¹,
П. А. Перминов¹, И. А. Черных¹, М. Л. Занавескин¹

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: ezivan9@gmail.com

Поступила в редакцию 12.05.2022 г.

После доработки 12.05.2022 г.

Принята к публикации 28.05.2022 г.

На AlN/GaN-гетероструктурах на подложках кремния созданы и исследованы сверхвысокочастотные транзисторы. Максимальный удельный ток насыщения составил более 1 А/мм, крутизна сток-затворной характеристики – 444 мСм/мм. Пределные частоты усиления по току f_t и мощности f_{max} составили 124 и 161 ГГц соответственно. Коэффициент усиления по мощности равен 13.7 дБ на частоте 30 ГГц.

DOI: 10.56304/S1992722322060048

ВВЕДЕНИЕ

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) и монолитные интегральные схемы на основе гетероструктур нитрида галлия являются востребованными компонентами твердотельной сверхвысокочастотной (СВЧ) микроэлектроники. Актуальной задачей является создание монолитных интегральных схем (МИС) миллиметрового диапазона частот (30–100 ГГц) для применения в средствах связи, радиолокации и радиоэлектронной борьбы [1]. Переход к более высоким частотам приводит к появлению новых требований, предъявляемых к гетероструктурам и технологии формирования ТВПЭ [2].

Во-первых, повышение рабочих частот ТВПЭ может быть достигнуто за счет уменьшения длины затвора и увеличения подвижности электронов в канале. Однако для стандартных гетероструктур AlGaIn/GaN уменьшение длины затвора приводит к возникновению короткоканальных эффектов [3]. Как было показано в [4], эффекты не проявляются при отношении длины затвора к расстоянию от затвора до канала транзистора выше 15. Таким образом, классические гетероструктуры с барьерным слоем AlGaIn толщиной 20–25 нм становятся неприменимы для затворов длиной менее 100–125 нм и частот 30 ГГц и выше. Решением является либо утонение барьерного слоя гетероструктуры AlGaIn с увеличением мольной доли алюминия, либо переход на барьерный слой из AlN. Исследования показывают,

что AlN малой толщины в качестве барьерного слоя обеспечивает высокую плотность носителей двумерного электронного газа (ДЭГ) при низком слоевом сопротивлении, повышает холловскую подвижность носителей ДЭГ, а также снижает подзатворные утечки тока [5, 6].

Во-вторых, необходимо обеспечить минимальное сопротивление транзистора в открытом состоянии R_{on} , что достигается уменьшением сопротивления омических контактов стока и истока, а также уменьшением расстояния между ними. Наиболее распространенный метод создания омических контактов на основе быстрого термического отжига не позволяет достичь низких значений сопротивления для гетероструктур с барьерным слоем из AlN или с тонкими слоями AlGaIn с высокой мольной долей алюминия [7]. Омические контакты на основе доразрастания сильнолегированного GaN являются практически единственными возможными элементами для создания транзисторов миллиметрового диапазона, так как обеспечивают низкие значения контактного сопротивления контактов и их воспроизводимость [8–11].

В-третьих, для достижения высоких рабочих частот необходимо уменьшить паразитные емкости затвор–исток и затвор–сток, а также активное сопротивление затвора. Это может быть достигнуто путем использования отдельно стоящих “грибообразных” затворов с тонкой конформной пассивацией [12]. Таким образом, для создания

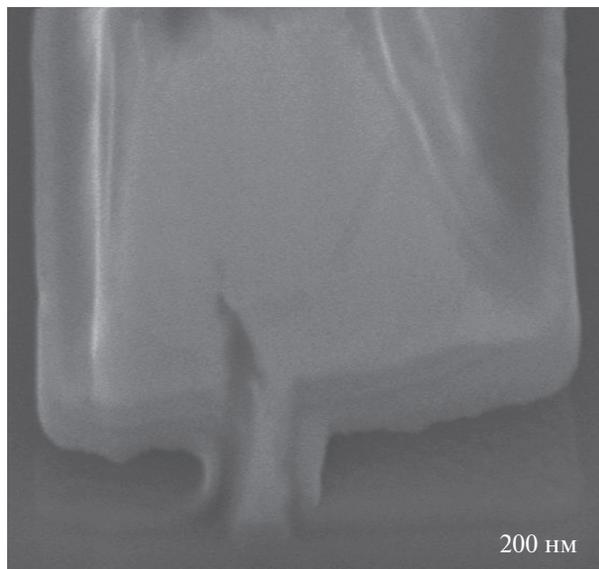


Рис. 1. Изображение поперечного среза затвора, полученное в растровом электронном микроскопе.

СВЧ-транзисторов миллиметрового диапазона частот требуются разработка и внедрение новых материалов и подходов к их изготовлению. В работе созданы транзисторы на подложках кремния, исследованы их статические и частотные характеристики.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Статические характеристики транзисторов 2×100 мкм с длиной затвора 100 нм (рис. 1), измеренные зондовым методом, представлены на рис. 2. Измерения проводили в режиме постоянного тока. Максимальный удельный ток насыщения транзистора составил более 1 А/мм при напряжении сток–исток $V_{ds} = 3.2$ В (рис. 2а), максимальная крутизна транзистора составила 444 мСм/мм при напряжении на затворе $V_g = -1.5$ В (рис. 2б), напряжение отсечки $V_{GS(off)} = -2.5$ В. Утечка затвора по стоку при $V_g = -5$ В не превышала 85 мкА (0.425 мА/мм) вплоть до $V_{ds} = 70$ В (рис. 2в).

СВЧ-характеристики транзисторов. Измерение S -параметров транзисторов проводили с помощью векторного анализатора в диапазоне частот от 0.1 до 40 ГГц. По S -параметрам строили частотные зависимости модуля коэффициента передачи по току $|h_{21}|$, максимально достижимого/стабильного коэффициента усиления по мощности (MAG/MSG) и коэффициента усиления Масона U .

Предельные частоты усиления по току f_t и мощности f_{max} определяли методом линейной экстраполяции к более высоким частотам зависи-

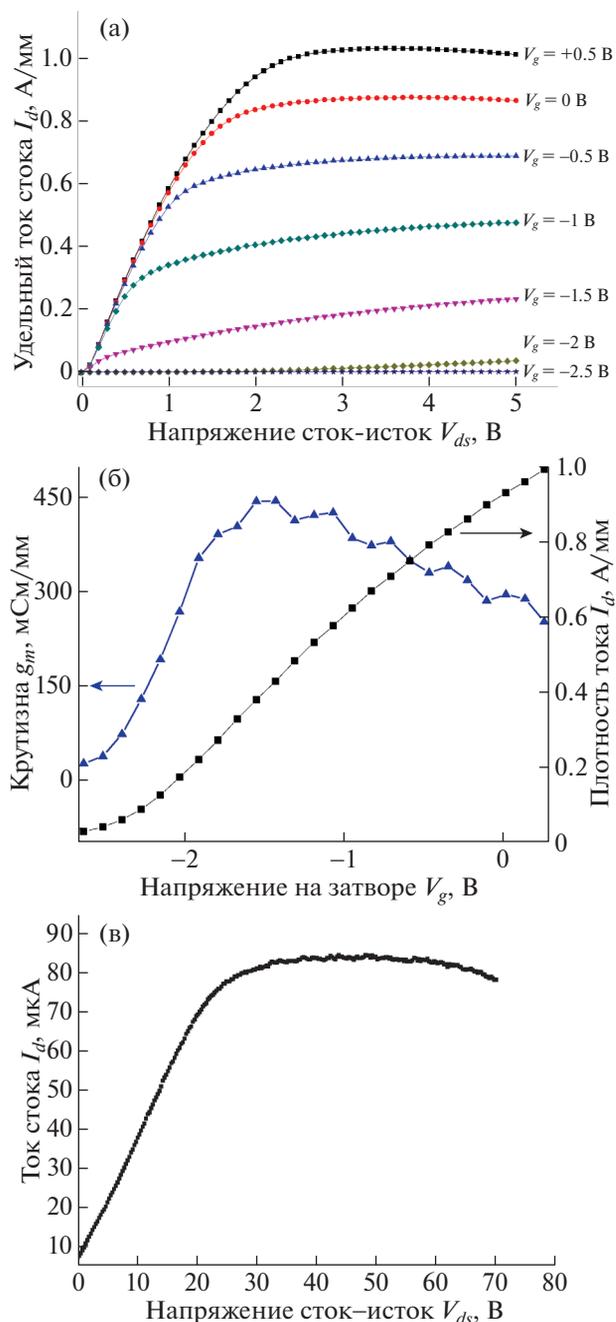


Рис. 2. Выходные статические характеристики транзисторов: а – вольт-амперная характеристика транзистора (напряжение на затворе $V_g = -2.5...+0.5$ В с шагом 0.5 В), б – сток-затворная характеристика транзистора, в – утечка затвора по стоку при $V_g = -5$ В.

остей $|h_{21}|$, MAG/MSG и U , построенных в логарифмическом масштабе, они составили 124 и 161 ГГц соответственно (рис. 3).

Как видно из рис. 3б, положение точки перехода MSG в MAG для данных транзисторов находится за пределами исследуемого диапазона ча-

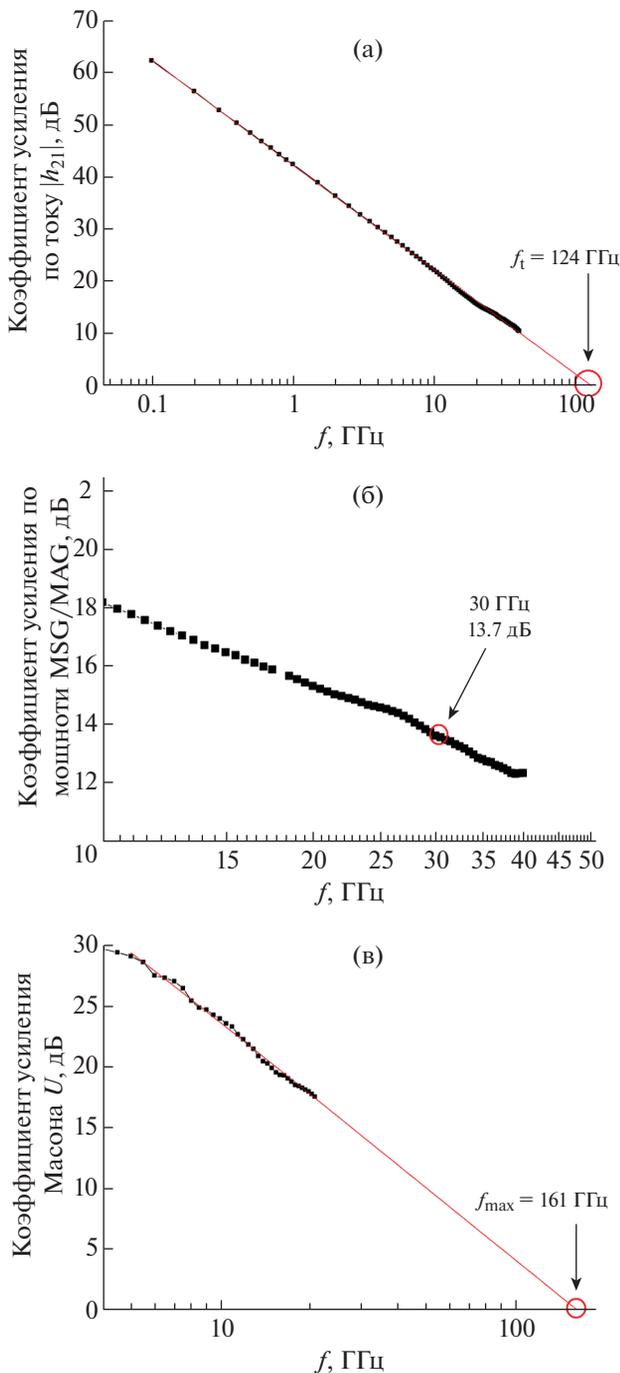


Рис. 3. Частотные зависимости: а – модуля коэффициента передачи по току $|h_{21}|$, б – коэффициента усиления по мощности MSG/MAG, в – коэффициента усиления Масона U . Напряжение смещения сток–исток +5 В, напряжение на затворе $V_g = -1$ В.

стот (более 40 ГГц). Коэффициент усиления по мощности на частоте 30 ГГц составил 13.7 дБ.

Измерения статических параметров проводили на зондовой станции Cascade PM5 (Cascade Microtech GmbH, США) с помощью двухканального источника-измерителя Keithley 2636В

(Keithley, Китай) при комнатной температуре в режиме постоянного тока. Измерения малосигнальных СВЧ-характеристик осуществляли на зондовой станции с зондами модели Z-probe 67GHz и сетевом анализаторе Agilent E8361C (Keysight Technologies, США).

ОБСУЖДЕНИЕ

На данный момент одной из ведущих мировых компаний по созданию МИС миллиметрового диапазона GaN на кремнии является ОММИС (Франция), которая работает по принципу открытого “фаундри”. Одним из базовых транзисторов данной компании для создания МИС миллиметрового диапазона частот является транзистор с длиной и шириной затвора 100 нм и 4×50 мкм соответственно и расстоянием исток–сток 1 мкм. В табл. 1 приведено сравнение параметров транзисторов, полученных в данной работе, с транзисторами ОММИС [14].

Сопоставление результатов из табл. 1 свидетельствует о практически идентичных частотных характеристиках транзисторов, созданных по технологии ОММИС и по технологии НИЦ “Курчатовский институт”. Однако статические характеристики существенно различаются. Отметим, что в обоих случаях используется технология доращиваемых контактов. Компания ОММИС использует гетероструктуры с более тонким барьерным слоем, о чем свидетельствует меньшее напряжение отсечки (–2 В) по сравнению с –2.5 В у наших ТВПЭ. Сближение контактов транзистора до расстояния 1 мкм позволило увеличить плотность тока насыщения до 1.2 А/мм и крутизну сток–затворной характеристики до рекордного уровня 800 мСм/мм. В данном случае расстояние исток–сток 3 мкм позволило уменьшить напряжение насыщения тока стока до 3 В, при этом максимальная крутизна сток–затворной характеристики g_m составила 444 мСм/мм при напряжении на затворе $V_g = -1.43$ В, в то же время $g_m > 400$ мСм/мм в диапазоне напряжений на затворе –1.67...–1.07 В. Также следует отметить высокое пробивное напряжение, которое составило более 70 В.

Полученные результаты находятся на высоком мировом уровне и имеют высокий потенциал дальнейшего развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы частотные характеристики двухпальцевых ТВПЭ 2×100 мкм с длиной затвора 100 нм на гетероструктурах AlN/GaN. В результате измерений S-параметров определены предельные частоты усиления по току f_1 и мощности f_{max} , которые составили 124 и 161 ГГц соответственно.

Таблица 1. Сравнение измеренных параметров транзисторов с параметрами транзистора ОММИС

Параметры	Транзистор ОММИС	Транзистор НИЦ “КИ”
Коэффициент усиления по мощности на 30 ГГц, дБ	13	13.7
Предельная частота усиления по току f_t , ГГц	110	124
Предельная частота усиления по мощности, f_{max} , ГГц	180	161
Пробивное напряжение, В	36	>70
Расстояние исток–сток, мкм	1	3
Напряжение отсечки, В	–2	–2.5
Максимальная крутизна стоко–затворной характеристики g_m , мСм/мм	800	444
Максимальная плотность тока стока, А/мм	1.2	>1

Максимальная крутизна транзисторов составила 444 мСм/мм при высоком пробивном напряжении свыше 70 В, что делает эти транзисторы перспективными для создания МИС для использования в системах связи, радиолокации и радиоэлектронной борьбы миллиметрового диапазона длин волн (30–100 ГГц).

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” (приказ от 28.10.2021 № 2753).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mayeda J., Lie D., Lopez J.* // Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCAS). WACO, TX, USA. 2017. P. 1. <https://doi.org/10.1109/WMCAS.2017.8070699>
2. *Мокеров В.Г., Кузнецов А.Л., Фёдоров Ю.В. и др.* // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 49. № 4. С. 561. <https://doi.org/10.1134/S1063782609040253>
3. *Breitschädel O., Kley L., Gräbeldinger H. et al.* // Mater. Sci. Eng. B. 2001. V. 82. P. 238. [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(00\)00747-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(00)00747-9)
4. *Jessen G.H., Fitch R.C., Gillespie J.K. et al.* // IEEE Trans. Electron. Dev. 2007. V. 54. № 10. P. 2589. <https://doi.org/10.1109/TED.2007.904476>
5. *Xia Y., Zhu Y., Liu Ch. et al.* // Mater. Res. Express. 2020. V. 7. P. 065902. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AB96F5>
6. *Cao Y., Jena D.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 182112. <https://doi.org/10.1063/1.2736207>
7. *Zimmermann T., Deen D., Cao Y. et al.* // Phys. Status Solidi. C. 2008. V. 5. № 6. P. 2030. <https://doi.org/10.1002/pssc.200778724>
8. *Saunier P., Schuette M.L., Chou T.M. et al.* // IEEE Trans. Electron. Dev. 2013. V. 60. № 10. P. 3099. <https://doi.org/10.1109/TED.2013.2277772>
9. *Tang Y., Shinohara K., Regan D. et al.* // IEEE Electron Device Lett. 2015. L. V. 36. № 6. P. 549. <https://doi.org/10.1109/LED.2015.2421311>
10. *Guo H.-Y., Lv Y.-J., Gu G.-D. et al.* // Chinese Phys. Lett. 2015. V. 32. № 11. P. 118501. <https://doi.org/10.1088/0256-307x/32/11/118501>
11. *Huang T., Liu C., Bergsten J. et al.* // Proc. 2016 Compound Semiconductor Week (CSW). Toyama, Japan. 2016. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICIPRM.2016.7528722>
12. *Zhang X.W., Jia K.J., Wang Y.G. et al.* // Appl. Mech. Mater. 2013. P. 1790. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.347-350.1790
13. *Lev L.L., Maiboroda I.O., Husanu M.A. et al.* // Nature Commun. 2018. V. 9. P. 2653. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04354-x>
14. *Colangeli S., Ciccognani W., Longhi P.E. et al.* // Electronics. 2021. V. 10. P. 134. <https://doi.org/10.3390/electronics10020134>