МАЛОШУМЯЩИЙ ТРАНЗИСТОР С СОСТАВНЫМ КАНАЛОМ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$

© С. В. Миннебаев¹, А. Л. Филатов¹, В. В. Краснов²

¹АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

²АКЦ ФИАН, 117997, г. Москва, ГСП-7, Профсоюзная ул., 84/32

В данной статье представлен краткий обзор результатов работ иностранных исследовательских групп, посвящённых расчётам и измерениям СВЧ транзисторов с составным каналом на основе гетероструктур типа $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}/\text{Al}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{N}/\text{GaN}$. Группой исследователей из Южной Кореи под руководством З. Ченга были изготовлены опытные образцы GaN HEMT с составным каналом, которые обладали минимальным коэффициентом шума на уровне 0,7 дБ на частоте 1 ГГц. Согласно результатам проведённых исследований, возможно уменьшение минимального коэффициента шума до 1,2 дБ на частоте 10 ГГц при длине затвора (L_g), равной 1 мкм.

Ключевые слова: малошумящий транзистор, GaN HEMT, HEMT с составным каналом, коэффициент шума, барьерный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, TCAD

Сведения об авторах: Миннебаев Станислав Вадимович, minnebaev_sv@pulsarnpp.ru; Филатов Анатолий Леонидович, к.т.н., filatov_al@pulsarnpp.ru; Краснов Вячеслав Владимирович, vvkra@sci.lebedev.ru

LOW-NOISE $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ COMPOSITE-CHANNEL HEMT

S. V. Minnebaev¹, A. L. Filatov¹, V. V. Krasnov²

¹JSC «S&PE» Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

²Astro Space Center Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, 117997, Moscow, GSP-7, Profsoyuznaya street, 84/32

This paper provides a brief overview of the results of international studies, dedicated to simulations and measurements of $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}/\text{Al}_{0,05}\text{Ga}_{0,95}\text{N}/\text{GaN}$ composite-channel HEMTs. South Korean research group lead by Zh. Cheng produced composite-channel GaN HEMTs with minimum noise figure of 0,7 dB at 1 GHz. According to the results of the research, it is possible to reduce the minimum noise figure to 1,2 dB at 10 GHz, with 1 μm gate length (L_g) GaN HEMT.

Keywords: low-noise HEMT, GaN HEMT, composite-channel HEMT, noise figure, barrier layer $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, TCAD

Data of authors: Minnebaev Stanislav Vadimovich, minnebaev_sv@pulsarnpp.ru; Filatov Anatoly Leonidovich, Ph.D., filatov_al@pulsarnpp.ru; Krasnov Vyacheslav Vladimirovich, vvkra@sci.lebedev.ru

Введение

В настоящее время всё более широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре находят твердотельные усилители на основе СВЧ транзисторов на гетероструктурах типа $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ [1]. СВЧ транзисторы на данных типах гетероструктур обладают выдающимися характеристиками по уровню удельной выходной мощности порядка 5-6 Вт/мм (при $f = 10$ ГГц),

высокому значению пробивного напряжения, которое составляет не менее 150 В, а значение коэффициента полезного действия стока (КПД) составляет приблизительно 45-55 % [2, 3]. Как правило, благодаря вышеописанным характеристикам, $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMT (High Electron Mobility Transistor) используются в усилителях мощности передающих трактов устройств.

Однако в последние годы был опубликован ряд работ, демонстрирующих возможность применения AlGaIn/GaN HEMT в составе малошумящих усилителей приёмных устройств в достаточно широком диапазоне рабочих частот [4, 5]. Например, группа учёных из Исследовательского института электроники и телекоммуникаций (Тэджон, Южная Корея) представила в 2016 году свои результаты по созданию малошумящего транзистора на основе AlGaIn/GaN гетероструктуры с длиной затвора 0,17 мкм с минимальным коэффициентом шума 0,5 и 0,84 дБ на частотах 10 и 18 ГГц соответственно [6]. Данные результаты вполне сопоставимы с параметрами промышленно выпускаемых образцов малошумящих транзисторов TGF2025 на основе GaAs pHEMT [7]. А так как помимо вышеописанных факторов СВЧ транзисторы на основе AlGaIn/GaN являются устойчивыми к воздействию входной мощности порядка 10 Вт/мм [8], их применение в составе малошумящих усилителей возможно без использования защитного устройства, что говорит о перспективности проводимых исследований в данной области твердотельной электроники. В статье проведён обзор работ различных исследовательских групп, связанных с разработкой и изготовлением малошумящих СВЧ транзисторов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN с составным каналом.

Структура GaN HEMT с составным каналом

Идея создания СВЧ транзистора на гетероструктуре с составным каналом была предложена исследовательской группой из Гонконгского универ-

ситета науки и технологии (Китай), возглавляемой З. Ченгом [9]. Данный тип структуры позволил им изготовить транзистор, который помимо низкого уровня шумов одновременно демонстрировал большой коэффициент усиления и высокую линейность. Для транзистора с длиной затвора (L_g) 1 мкм коэффициент усиления на частоте 2 ГГц составил 22 дБ, а точка пересечения искажений 3-го порядка 33,2 дБ. Схематичный вид в разрезе AlGaIn/GaN HEMT с составным каналом представлен на рис. 1.

Характерная особенность данного типа гетероструктуры заключается в конструкции непосредственно самого канального слоя СВЧ транзистора, в котором используется слой нелегированного $Al_{0,05}Ga_{0,95}N$ толщиной 6 нм, заключённый между барьерным слоем $Al_{0,3}Ga_{0,7}N$ и буфером GaN. Благодаря такой конфигурации на границе раздела $Al_{0,3}Ga_{0,7}N/Al_{0,05}Ga_{0,95}N$ наблюдается снижение напряжённости поперечного электростатического поля (E_T), что, в свою очередь, приводит к уменьшению рассеяния электронов на гетерогранице. Аналогичный эффект можно наблюдать в гетероструктурах $Al_{0,3}Ga_{0,7}N/AlN/GaN$, где в состав структуры вводится спейсерный слой AlN толщиной 2 нм [10]. Данный эффект позволил получить плато на графике зависимости удельной крутизны транзистора (G_m) от напряжения на затворе (рис. 2), что даёт преимущество при проектировании усилителей, работающих в линейном режиме. На рис. 2б приведена входная вольтамперная характеристика GaN HEMT с составным каналом, изготовленного в отделении электротехники и электроники Гонконгского университета науки и технологии.

Рис. 1

Разрез AlGaIn/GaN HEMT с составным каналом

Рис. 2

Зависимость удельной крутизны GaN HEMT с составным каналом от напряжения «затвор-исток» (а) и входная ВАХ GaN HEMT (б)

При этом данные по подвижности и концентрации электронов в канальном слое находились примерно на том же уровне, который обычно получается при использовании традиционной гетероструктуры $Al_{0,3}Ga_{0,7}N/GaN$, и составляли $950 \text{ (см}^2/\text{В} \cdot \text{с)}$ и $1,3 \cdot 10^{13} \text{ (см}^{-2}\text{)}$ соответственно [9]. Основные электрофизические параметры для каждого из материалов, применяемых при создании гетероструктуры такого типа, приведены в табл. 1 [11].

В среде Silvaco TCAD исследовательской группой из Исламского университета Азад (Эрак, Иран) был произведён расчёт диаграммы дна зоны проводимости рассматриваемой гетероструктуры, результаты которого приведены на рис. 3. Для гетероструктуры СВЧ транзистора с составным каналом были также рассчитаны значения плотности поляризационного заряда, возникающего на границах раздела $Al_{0,3}Ga_{0,7}N/Al_{0,05}Ga_{0,95}N$ и $Al_{0,05}Ga_{0,95}N/GaN$, которые составили $1,12 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и $1,93 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно [12].

Шумовые характеристики GaN HEMT с составным каналом

Как уже было описано выше, снижение напряжённости поперечного электростатического поля приводит к тому, что происходит перераспреде-

ние носителей заряда в сторону от гетерограницы $Al_{0,3}Ga_{0,7}N/Al_{0,05}Ga_{0,95}N$. Более того, при низких значениях тока стока (I_d) основной вклад в него вносят носители заряда, находящиеся в канале, образованном на гетерогранице $Al_{0,05}Ga_{0,95}N/GaN$, а соответственно, находятся максимально далеко от барьерного слоя $n-Al_{0,3}Ga_{0,7}N$, что приводит к снижению количества рассеиваемых электронов и уменьшению коэффициента шума GaN HEMT. Также на значение NF_{min} транзистора значительное влияние оказывает температура активной области прибора, которая зависит не только от качества теплоотвода, но и от значения тока стока (I_{ds}). Поэтому для определения оптимальной рабочей точки транзистора с точки зрения шумовых параметров исследовательской группой Гонконгского университета науки и технологии были проведены измерения минимального коэффициента шума транзистора при различных значениях тока стока (I_{ds}).

Измерения шумовых параметров СВЧ транзисторов с составным каналом были проведены непосредственно на пластине с использованием методики Source Pull, разработанной фирмой Maury Microwave. Рабочая точка СВЧ транзистора задавалась при этом следующими параметрами: напряжение сток-исток (U_{ds}) составляло 6 В, ток стока (I_{ds}) был равен 10 мА, значение режимного тока стока

Таблица 1

Параметры слоёв гетероструктуры GaN HEMT с составным каналом

Слой гетероструктуры	Ширина запрещённой зоны, эВ	Подвижность, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Энергия сродства к электрону, эВ
$Al_{0,3}Ga_{0,7}N$	4,023	800	2,97
$Al_{0,05}Ga_{0,95}N$	3,508	950	3,35
GaN	3,42	1100	3,42

Рис. 3

Диаграмма дна зоны проводимости GaN HEMT с составным каналом

составило 15 % от начального тока стока транзистора. Результаты измерений минимального коэффициента шума (NF_{min}) и соответствующего коэффициента усиления (K_y) продемонстрированы на рис. 4 [9].

Минимальный коэффициент шума на частоте 1 ГГц для GaN HEMT с составным каналом получился равным 0,7 дБ, что является рекордным значением для малошумящих СВЧ транзисторов на основе AlGaIn/GaN с $L_g = 1$ мкм.

После определения оптимального значения тока стока (I_{ds}) транзистора и измерений значения минимального коэффициента шума на различных частотах в диапазоне от 0,1 до 10 ГГц было решено провести исследование зависимости NF_{min} от напряжения сток-исток в области насыщения выходной

ВАХ транзистора, результаты которого показали достаточно слабую зависимость этих параметров друг от друга. Таким образом, выбор значения напряжения сток-исток (U_{ds}) может быть сделан из соображений оптимизации таких параметров, как линейность, уровень выходной мощности или коэффициент полезного действия без негативного влияния на шумовые характеристики прибора [9].

Влияние топологических размеров на шумовые характеристики GaN HEMT с составным каналом

В ходе проведения исследований шумовых параметров GaN HEMT с составным каналом измерениям характеристик подвергались приборы с различ-

(а)

(б)

Рис. 4

Результаты измерений СВЧ параметров GaN HEMT с составным каналом:

а) минимальный коэффициент шума; б) коэффициент усиления

Таблица 2

Топологические размеры образцов GaN HEMT с составным каналом

№ образца	Длина затвора (L_g), мкм	Расстояние исток-затвор, мкм	Расстояние затвор-сток, мкм
1-0,5-1-A	1	0,5	1
1-1-1-A	1	1	1
1-1-1,5-A	1	1	1,5
1-1-2-A	1	1	2
1,5-1-1-A	1,5	1	1

ными топологическими размерами, такими как расстояние исток-затвор, расстояние затвор-сток и непосредственно длина затвора. Данные о топологических особенностях измеряемых устройств приведены в табл. 2.

По результатам измерений, представленных на рис. 5, можно сделать вывод о том, что ключевым параметром для минимального коэффициента шума GaN HEMT с составным каналом является длина затвора (L_g). Однако влияние расстояний исток-затвор и затвор-сток также заметно отражается на шумовых параметрах приборов, что можно объяснить увеличением их входного сопротивления, связанным с увеличением физической длины канала [9].

Аналогичный характер зависимости минимального коэффициента шума от топологических параметров транзистора был продемонстрирован исследовательской группой из университета в Эраке (Иран) в работе [11], где проводилось моделирование шумовых характеристик GaN HEMT с составным каналом в среде Silvaco TCAD. По результатам моделирования был сделан вывод о том, что при увеличении физической длины канала происходит

уменьшение его общей проводимости, что в свою очередь приводит к увеличению коэффициента шума. Следовательно, для достижения наименьшего значения коэффициента шума GaN HEMT с составным каналом необходимо снижать расстояние исток-затвор и длину затвора (L_g) до минимальных размеров, допускаемых применяемым технологическим процессом, а при выборе расстояния затвор-сток помимо технологических ограничений стоит учитывать его влияние на значение пробивного напряжения сток-исток (U_{BDS}).

Влияние параметров барьерного слоя $Al_xGa_{1-x}N$ на шумовые характеристики GaN HEMT с составным каналом

Как правило, в качестве основных параметров барьерного слоя $Al_xGa_{1-x}N$ рассматривают непосредственно его толщину и мольную долю содержания алюминия в его составе. Толщина барьерного слоя влияет на «управляемость» транзистора, то есть на такие параметры, как напряжение и ток отсечки транзистора, ток утечки затвора и крутизна транзистора.

Рис. 5

Зависимость минимального коэффициента шума от топологических параметров GaN HEMT с составным каналом

Рис. 6

Результаты моделирования параметров барьерного слоя GaN HEMT с составным каналом:

а) зависимость NF_{min} от толщины барьерного слоя;

б) зависимость NF_{min} от содержания алюминия в составе барьерного слоя

Мольная доля алюминия в его составе определяет величину пьезоэлектрической поляризации, а следовательно, концентрацию носителей заряда в слое двумерного электронного газа (ДЭГ).

Группа исследователей под руководством Робаба Мамади произвела расчёты зависимости шумовых характеристик GaN HEMT с составным каналом от состава и толщины барьерного слоя [12]. Моделирование проводилось в среде Silvaco TCAD для рабочих частот 5 ГГц и 10 ГГц. Режим работы транзистора был задан следующими параметрами: напряжение сток-исток — 6 В, напряжение затвор-исток — минус 3 В. Результаты моделирования приведены на графиках, представленных на рис. 6.

Согласно данным, полученным в результате моделирования GaN HEMT с составным каналом, при увеличении содержания мольной доли алюминия в составе барьерного с 0,15 до 0,30 происходит снижение минимального коэффициента шума транзистора, что объясняется увеличением проводимости канала. Также наблюдается увеличение NF_{min} при увеличении толщины барьерного слоя от 15 до 21 нм. По результатам, приведённым выше, можно сказать, что на рис. 1 представлена гетероструктура GaN HEMT с составным каналом, обладающая оптимальными с точки зрения шумовых характеристик параметрами.

Заключение

Исследовательской группой из Исследовательского института электроники и телекоммуникаций (Тэджон, Южная Корея) была предложена гетероструктура GaN HEMT с составным каналом, которая позволяет достигать значения минимального коэффициента шума 0,7 дБ на частоте 1 ГГц при длине затвора 1 мкм и ширине затворной секции 100 мкм.

Такие результаты являются рекордным показателем для GaN транзисторов с аналогичной периферией. Впоследствии группой учёных из Технологического университета им. Шарифа и университета в Эраке (Иран) было проведено моделирование статических и шумовых характеристик GaN HEMT с составным каналом, которые показали хорошее совпадение с данными, полученными на реальных образцах приборов. Также в их работах была рассмотрена возможность дальнейшей оптимизации конструкции гетероструктуры и топологических параметров транзисторов с целью достижения значения минимального коэффициента шума GaN HEMT равного 1,2 дБ на частоте 10 ГГц. Таким образом, можно сделать вывод о перспективности ведения исследовательских работ в направлении создания GaN HEMT с составным каналом.

Литература

1. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. — Москва: Техносфера, 2011. — 416 с.
2. Joshin K., Kikkawa T., Hayashi H., Yokogawa S., Yokoyama M., Adachi N., and Takikawa M. A 174 W high-efficiency GaN HEMT power amplifier for W-CDMA base station applications // in IEDM Tech. Dig., Dec. 2003, pp. 983-985.
3. Wu Y. F., Saxler A., Moore M., Smith R. P., Sheppard S., Chavarkar P. M., Wisleder T., Mishra U. K., and Parikh P. 30-W/mm GaN HEMT's by field plate optimization // IEEE Electron Device Lett., vol. 25, no. 3, pp. 117-119, Mar. 2004.
4. Xu H., Sanabria C., Chini A., Keller S., Mishra U. K., and York R. A. A C-band high-dynamic range GaN

- HEMT low-noise amplifier // IEEE Microw. Wireless Components Lett., vol. 14, no. 6, pp. 262-264, Jun. 2004.
5. Lee J.-W., Kuliev A., Kumar V., Schwindt R., and Adesida I. Microwave noise characteristics of AlGa_{0.3}N/GaN HEMT's on SiC Substrates for broadband low-noise amplifiers // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 14, no. 6, pp. 259-261, Jun. 2004.
6. Yoon H. S., Min B. G., Lee J. M., et al. Microwave Low-Noise Performance of 0,17μm gate-length AlGa_{0.3}N/GaN HEMTs on SiC with wide head double-deck T-shaped gate // IEEE Electron Device Lett., vol. 37 no. 11, pp. 1407-1411, Nov. 2016.
7. TGF-2025 – datasheet. Qorvo Inc.
8. Аболдуев И. М., Гладышева Н. Б., Дорофеев А. А., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. Опыт разработки GaN СВЧ полевых транзисторов ФГУП «НПП «Пульсар» // Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы», 2009, с. 140-141.
9. Cheng Zh., Liu J., Zhou Y., Cai Y., Chen K. J., Lau K. M. Broadband Microwave Noise Characteristics of High-Linearity Composite-Channel Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_{0.05}Ga_{0.95}N/GaN HEMTs // IEEE Electron Device Letters, vol. 26, no. 8, August 2005, pp. 521-523.
10. Sanabria C., Xu H., Palacios T., Chakraborty A., Heikman S., Mishra U. K., and York R. A. Influence of the heterostructure design on noise figure of AlGa_{0.3}N/GaN HEMTs // in Proc. 62nd Device Research Conf., Notre Dame, IN, Jun. 21-23, 2004, pp. 43-44.
11. Mamadi R., Faez R., Behtoe B. Influence of Physical Parameters on Microwave Noise Characteristics of Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_{0.05}Ga_{0.95}N/GaN Composite-Channel HEMTs // International Journal of Applied Physics and Mathematics, vol. 2, no. 6, November 2012, pp. 442-445.
12. Mamadi R., Faez R. Influence of Aluminum Concentration of Barrier on Noise Characteristics of Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_{0.05}Ga_{0.95}N/GaN HEMTs // 5 th SASTech 2011, Khavaran Higher-education Institute, Mashhad, Iran, May 12-14.
- W-CDMA base station applications // in IEDM Tech. Dig., Dec. 2003, pp. 983-985.
3. Wu Y. F., Saxler A., Moore M., Smith R. P., Sheppard S., Chavarkar P. M., Wisleder T., Mishra U. K., and Parikh P. 30-W/mm GaN HEMT's by field plate optimization // IEEE Electron Device Lett., vol. 25, no. 3, pp. 117-119, Mar. 2004.
4. Xu H., Sanabria C., Chini A., Keller S., Mishra U. K., and York R. A. A C-band high-dynamic range GaN HEMT low-noise amplifier // IEEE Microw. Wireless Components Lett., vol. 14, no. 6, pp. 262-264, Jun. 2004.
5. Lee J.-W., Kuliev A., Kumar V., Schwindt R., and Adesida I. Microwave noise characteristics of AlGa_{0.3}N/GaN HEMT's on SiC Substrates for broadband low-noise amplifiers // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 14, no. 6, pp. 259-261, Jun. 2004.
6. Yoon H S., Min B. G., Lee J. M., et al. Microwave Low-Noise Performance of 0,17μm gate-length AlGa_{0.3}N/GaN HEMTs on SiC with wide head double-deck T-shaped gate // IEEE Electron Device Lett., vol. 37 no. 11, pp. 1407-1411, Nov. 2016.
7. TGF-2025 – datasheet. Qorvo Inc.
8. Abolduev I. M., Gladysheva N. B., Dorofeev A. A., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. «S&PE «PULSAR» Microwave GaN FET Research Experience. Vserossiyskaya konferentsiya «Nitridy Galliia, Indiya i Allyuminiya: struktury i pribory» [All-Russian conference «Nitrides of Gallium, Indium and Aluminum: structures and devices»], 2009, pp. 140-141.
9. Cheng Zh., Liu J., Zhou Y., Cai Y., Chen K. J., Lau K. M. Broadband Microwave Noise Characteristics of High-Linearity Composite-Channel Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_{0.05}Ga_{0.95}N/GaN HEMTs // IEEE Electron Device Letters, vol. 26, no. 8, August 2005, pp. 521-523.
10. Sanabria C., Xu H., Palacios T., Chakraborty A., Heikman S., Mishra U. K., and York R. A. Influence of the heterostructure design on noise figure of AlGa_{0.3}N/GaN HEMTs // in Proc. 62nd Device Research Conf., Notre Dame, IN, Jun. 21-23, 2004, pp. 43-44.
11. Mamadi R., Faez R., Behtoe B. Influence of Physical Parameters on Microwave Noise Characteristics of Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_{0.05}Ga_{0.95}N/GaN Composite-Channel HEMTs // International Journal of Applied Physics and Mathematics, vol. 2, no. 6, November 2012, pp. 442-445.
12. Mamadi R., Faez R. Influence of Aluminum Concentration of Barrier on Noise Characteristics of Al_{0.3}Ga_{0.7}N/Al_{0.05}Ga_{0.95}N/GaN HEMTs // 5 th SASTech 2011, Khavaran Higher-education Institute, Mashhad, Iran, May 12-14.

References

1. Vasilyev A. G., Kolkovsky Yu. V., Kontsevov Yu. A. *SVCH pribory i ustroystva na shirokozonnnykh poluprovodnikakh* [Wide-band gap semiconductor based microwave devices]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011, 416 p.
2. Joshin K., Kikkawa T., Hayashi H., Yokogawa S., Yokoyama M., Adachi N., and Takikawa M. A 174 W high-efficiency GaN HEMT power amplifier for