

МОЩНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА НИТРИДЕ ГАЛЛИЯ

Раков Ю. Н.¹, Мончарес Н. В.¹, Боброва Т. П.¹, Узельман Г. Ф.¹, Мякишев Ю. Б.¹,
Бондарева Т. К.¹, Свешников Ю. Н.²

¹ОАО «Октава»

Красный проспект, 220, а/я 314, г. Новосибирск, 630049, Россия
тел.: 383-2258859, e-mail: oktava2006@ngs.ru

²ЗАО «Элма-Малахит»
г. Зеленоград, Россия

Аннотация — Разработаны гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN, выращенные на подложках сапфира, конструкция и технология изготовления интегральных полевых транзисторов (ПТ). ПТ обеспечили удельную выходную мощность 7,57 Вт/мм, КПД=43,5 % и коэффициент усиления 5,6 дБ на частоте 12 ГГц.

I. Введение

Для современных усилителей мощности X-диапазона частот требуются интегральные транзисторы с высокими значениями удельной выходной мощности ($P_{уд}$) и КПД. Уникальные свойства широкозонного материала GaN и гетероструктур (ГС) AlGaN/GaN позволили получить высокие значения удельной выходной мощности полевых транзисторов: 30 Вт/мм (8 ГГц) – на подложке SiC и 12 Вт/мм (4 ГГц), 4,5 Вт/мм (20 ГГц) – на подложках сапфира [1-3]. В ОАО «Октава» на частоте 12 ГГц получена [4] удельная максимальная выходная мощность 5,5 Вт/мм на нитридном AlGaN/GaN ПТ с затвором 0,25×300 мкм, изготовленном на отечественных гетероструктурах, выращенных МOCVD-технологией на подложке сапфира. В данном сообщении изложены новые результаты разработки ГС, выращенной на подложке сапфира, конструкции и технологии мощного интегрального ПТ X-диапазона частот с высокими значениями удельной выходной мощности и КПД.

II. Основная часть

Для создания мощных ПТ были использованы ГС AlGaN/AlN/GaN, выращенные на поверхности (0001) подложки сапфира методом МOCVD. Для достижения высокой концентрации электронов в двумерном электронном газе (ДЭГе) в слое AlGaN выполнено легирование Si с концентрацией $3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис.1). Толщины слоев выбирались исходя из требуемых для усилителей мощности X-диапазона частот величин напряжения отсечки и максимального тока стока. ГС были выращены ЗАО «Элма-Малахит» [3] и имели в ДЭГе при $T=300 \text{ }^\circ\text{C}$ концентрацию и подвижность носителей заряда $n_s = 1.35 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и $\mu_n = 1340 \text{ см}^2/\text{Вс}$, соответственно.

Структура ПТ (HFET)

$i\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Защитный слой	25 Å
$n^+\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Si $=3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$	150 Å
$i\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Спейсер	20 Å
$i\text{-AlN}$ модификатор квантовой ямы	10 Å
Буфер GaN	2,5 мкм
Сапфир (0001)	430 мкм

Рис. 1. Гетероструктура AlGaN/AlN/GaN примененная для создания мощного ПТ.

Fig. 1. AlGaN/AlN/GaN heterostructures applied for development of power HFETs

Были изготовлены интегральные AlGaN/AlN/GaN ПТ с длиной затвора $L_z = 0.25 \text{ мкм}$ конструкции, представленной на рис.2. ПТ, предназначенные для использования в усилителях мощности, имели ширину затвора $W_T = 1200 \text{ мкм}$, а тестовый ПТ, используемый для отработки гетероструктур и конструкции ПТ – 300 мкм. Геометрия ПТ: $L_{ис} = 3,6 \text{ мкм}$, $L_{и} = L_c = 23 \text{ мкм}$, шаг структуры 31 мкм.

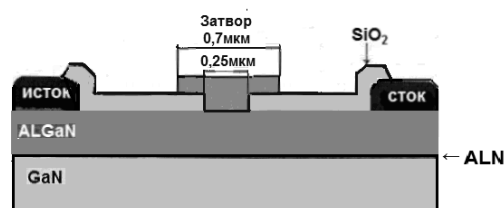


Рис. 2. Конструкция AlGaN/AlN/GaN ПТ.

Fig. 2. Design of AlGaN/AlN/GaN HFET

Омические контакты истока и стока имеют металлизацию Ti(350 Å)/Al(1500 Å)/Ni(450 Å)/Au(500 Å) и сформированы методом взрыва электронной литографией с применением двухслойной маски из электрон-резиста и пленки SiO₂ и вжигались при температуре 820 °C в течении 30 сек [3]. Энергия внедряемых изолирующих ионов бора $E = 120 \text{ кэВ}$, суммарная доза (2 -10) Мкл/см². Затвор Т-типа имеет металлизацию Ni(500 Å)/Au(200 Å) и сформирован методом взрыва с применением субмикронной электронной литографии по трехслойной маске из электрон-резистов C₂-LOR-C₂. Для межслойной изоляции применена пленка SiO₂ толщиной 0,2 мкм, получаемая пиролизом ($T = 340 \text{ }^\circ\text{C}$).

В табл. 1 приведены удельные параметры ВАХ рассмотренной конструкции ПТ с $W_T = 300 \text{ мкм}$.

Табл. 1. Параметры ВАХ ПТ с $W_T = 300 \text{ мкм}$

Table 1. I-V -parameters of HFETs with $W_T = 300 \text{ }\mu\text{m}$

I_{Dmax} , mA/mm	S_{Tmax} , mS/mm	U_{th} , V	U_{BR} , V
670	150	-5.0	50 - 60

Оценка СВЧ параметров интегрального тестового ПТ на пластине производилась в непрерывном и импульсном ($\tau_{и} = 2 \text{ мкс}$, скважность $Q = 10$) режимах. Импульсный режим использовался с целью снижения температуры в канале ПТ при определении максимальной удельной выходной мощности, КПД и коэффициента усиления ($K_{уп}$) ПТ. На рис. 3 показаны измеренные СВЧ параметры тестового ПТ. В непрерывном режиме при $U_c = 14 \text{ В}$ на частоте 12 ГГц получены удельная выходная мощность $P_{уд} = 2,3 \text{ Вт/мм}$ и КПД = 47,3 %. В импульсном режиме, когда облегчен температурный режим в канале ГС ПТ, при $U_c = 18 \text{ В}$ получены $P_{уд} = 4,87 \text{ Вт/мм}$ и КПД = 50,7 % и при $U_c = 29 \text{ В}$ — $P_{уд} = 7,57 \text{ Вт/мм}$ и КПД = 43,5 %. При этом, коэффициент усиления ($K_{уп}$) составил 3.8 и 5.6 дБ,

соответственно. Эти результаты измерений указывают на необходимость обеспечения эффективного отвода тепла от канала нитридного ГС ПТ, даже при ширине затвора 300 мкм. Увеличение уровня максимальной удельной выходной мощности с 5,5 [4] до 7,57 Вт/мм достигнуто за счет отработки конструкции и технологии выращивания гетероструктуры, а также оптимизации технологических операций химических обработок пластин перед осаждением диэлектрика SiO₂ и нанесением металлизации затвора.

ГС ПТ с шириной затвора $W_T = 1200$ мкм применены при создании усилителей мощности X-диапазона частот [5].

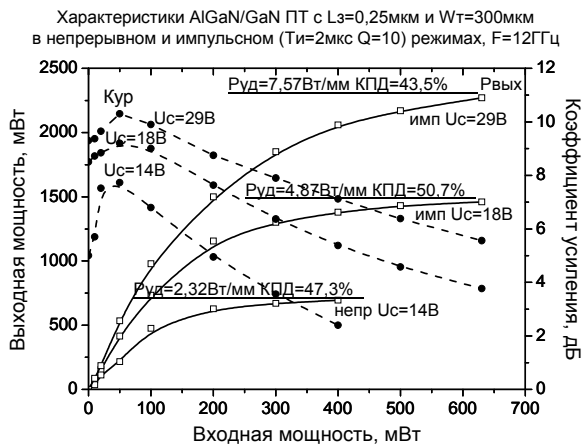


Рис. 3. СВЧ параметры ПТ на частоте 12 ГГц в непрерывном и импульсном режимах работы.

Fig. 3. Microwave characteristics of HFET at frequency of 12 GHz in CW and impulse modes of operation

III. Заключение

Разработаны гетероструктуры AlGaIn/AlN/GaN, выращенные на подложках сапфира, конструкция и технология изготовления интегральных ПТ с $P_{уд} = 7,57$ Вт/мм, КПД = 43,5 % и $K_{ур} = 5,6$ дБ на частоте 12 ГГц.

IV. Список литературы

- [1] 12 W/mm power density AlGaIn/GaN HFETs on sapphire substrate / A. Cini et al. // Electronics Letters. 2004. Vol. 40. No. 1.
- [2] High performance 0.25 μ m gate-length AlGaIn/GaN HFETs on sapphire with power density of over 4.5W/mm at 20GHz / V. Kumar et. al. // Solid-State Electronics. 2003. Vol. 47. P. 1577—1580.
- [3] AlGaIn/GaN- СВЧ HFET-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{max} до 100 ГГц / В. Г. Мокеров и др. // ФТП. 2009. Т. 43. Вып. 4. С. 561—567.
- [4] Мощные интегральные гетероструктурные полевые транзисторы на нитриде галлия / Ю. Н. Раков, Н. В. Мончарес, Т. К. Боброва и др. // 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы конф. (Севастополь, 13—17 сент. 2010 г.). Севастополь: Вебер, 2010. С. 101—102.
- [5] Усилитель X-диапазона на GaN КМИС с выходной мощностью 20 Вт / В. И. Гуляев, В. В. Глазунов, Г. С. Зыкова, Ю. Б. Мякишев // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: материалы конф. (Севастополь, 12—16 сент. 2011 г.). Севастополь: Вебер, 2011.

NITRIDE GALLIUM HIGH POWER INTEGRATED HETEROSTRUCTURE FETS

Rakov Yu. N.¹, Monchares N. V.¹, Bobrova T. P.¹, Uzelmann G. F.¹, Mjakishev Yu. B.¹, Bondareva T. K.¹, Sveshnikov Yu. N.²

Joint Stock Company «Oktava»
220, Krasnui av., post box 314, Novosibirsk, 630049,
Russia,

Ph.: 383-2258859, e-mail: oktava2006@ngs.ru

*ZAO «Elma-Malachit»

Zelenograd, Russia

Abstract — The heterostructures AlGaIn/AlN/GaN, grown on the sapphire substrates, the design of the integrated power HFET and its technology have been developed. HFETs have given the output power 7.57 W/mm, power efficiency (PE = 43.5 %) and power gain 5.6 dB at the frequency of 12 GHz.

I. Introduction

The modern power amplifiers of X-band urgently need integrated transistors with a high power and efficiency. The unique capabilities of the wideband gap GaN and AlGaIn/GaN heterostructures (HS) give possibility to obtain the high levels of the output power (P_{out}) of HFETs: 30 W/mm (8 GHz) – on SiC substrate and 12 W/mm (4 GHz), 4.5 W/mm (20 GHz) – on the sapphire substrates [1-3]. The new results of development of HS on the sapphire substrates and the devices of GaN HFETs of X-band with high output power and efficiency are given in this report.

II. Main Part

AlGaIn/AlN/GaN HS, grown on sapphire substrates (0001) by MOCVD, are used for power HFETs. For obtaining of the high current of 2 DEG the Si doping of 3×10^{18} cm⁻³ in AlGaIn layer was used (Fig. 1). There were measured the following parameters of 2 DEG at 300 °C: $n_s = 1.35 \times 10^{13}$ cm⁻² и $\mu_n = 1340$ cm²/Vs. HS (Fig.1) are grown by MOCVD in ZAO «Elma-Malachit» [3].

AlGaIn/AlN/GaN HFETs had the gate of T-form with the length (L_g) of 0.25 μ m on the bottom and 0.7 μ m on the top (Fig. 2). HFETs applied in MMICs [5] have the gate width (W_T) 1200 μ m, and HFETs applied for measurement of the microwave parameters on wafer used to evaluate HS and HFET device – $W_T = 300$ μ m. The other HFET dimensions are: $L_{SD} = 3.6$ μ m, $L_S = L_D = 23$ μ m and $L_{GG} = 31$ μ m. The ohmic contacts of Ti (350 Å) / Al (1500 Å) / Ni (450 Å) / Au (500 Å) stack were rapid thermal annealed at 820 °C for 30 s in N₂ -atmosphere. The gate had the stack of Ni (500 Å) / Au (200 Å). The inter-metal's layers isolation was made by SiO₂ film of 0.2 μ m. The mesa formation was made by implantation of B⁺ ions. I-V characteristics are given in Table 1. The CW and the impulse power per mm of the gate width of developed AlGaIn/AlN/GaN HFETs with $W_T = 300$ μ m are given in Fig. 3. At 12 GHz devices gave the CW $P_{out} = 2.3$ W/mm and PE = 47.3 %. In impulse mode of operation at the drain bias of $U_{ds} = 29$ V the devices gave $P_{out} = 7.57$ W/mm and PE = 43.5 %. The power gain was 5.6 dB. Those data of measurements strictly underline the urgent necessity of a good heat sink for AlGaIn/GaN HFETs, even with the gate width of 300 μ m. The output power increases from 5.5 to 7.5 W/mm was obtained thanks to the proper development of treatments of the chemical wafer before the operations of SiO₂-film covering and the gate stack deposition.

III. Conclusion

AlGaIn/AlN/GaN HS, grown on sapphire substrates, devices and technology of integrated power HFETs have been developed. These HFETs have given $P_{out} = 7.57$ W/mm, PE = 43.5 % and gain 5.6 dB at 12 GHz.