

УДК 621.382

Н.А. Торхов, В.Г. Божков, И.М. Добуш, А.С. Сальников, Л.И. Бабак

Мощные AlGaIn/GaN НЕМТ-транзисторы X- и Ku-диапазонов

Представлен мощный AlGaIn/GaN транзистор с высокой подвижностью электронов X- и Ku-диапазонов. Подобранный конструкция слоев гетероэпитаксиальной структуры разработанного транзистора позволила получить параметры статических и СВЧ-характеристик, близких к зарубежному аналогу CGHV1J006D производства компании Cree Inc. В отличие от аналога соединение истоков отдельных секций транзистора осуществлялось не металлизированными отверстиями, а более короткими двойными воздушными мостами. Ток стока в импульсном режиме составил $I_{Dmax} = 1,1$ А, пробивное напряжение 60 В, малосигнальный коэффициент усиления на частоте 10 ГГц составил $G_{SS} \approx 14$ дБ. Оценка максимального значения выходной мощности в импульсном режиме составила $P_{sat} \approx 6,8$ Вт. В отличие от аналога CGHV1J006D характеристики разработанного транзистора были дополнены его малосигнальной моделью.

Ключевые слова: AlGaIn/GaN, НЕМТ, импульсные статические и СВЧ-характеристики, линейная модель.

Использование широкозонных полупроводников, таких, как GaN, обладающих по сравнению с GaAs большей шириной запрещенной зоны ($E_g = 3,49$ эВ) и большей теплопроводностью (2 Вт/см/К) [1], позволяют получать НЕМТ-структуры на основе эпитаксиальных AlGaIn/GaN-гетерослоев, обладающих большими предельными значениями электрических полей ($E \approx 3,3 \times 10^6$ В/см) и, как следствие, большими пробивными напряжениями (> 100 В) для НЕМТ X- и Ku-диапазонов. Использование чужеродных подложек 4H-SiC (0001), обладающих в несколько раз большей теплопроводностью (4,5 Вт/см/К), позволяет значительно расширить температурный режим работы НЕМТ см-диапазона повысить их мощностные характеристики. В качестве примера можно привести зарубежный серийно выпускаемый AlGaIn/GaN НЕМТ CGHV1J006D с полной шириной затвора 6×200 мкм = 1200 мкм (1,2 мм) и длиной 0,25 мкм производства Cree Inc [2]. с пробивными напряжениями $U_{BD} = 100$ В и током стока насыщения $I_{Dmax} \approx 1,1$ А, с уровнем выходной СВЧ-мощности в импульсном режиме на частоте $f = 10$ ГГц более $P_{sat} = 6$ Вт при малосигнальном коэффициенте усиления $G_{SS} = 17$ дБ. Соединение истоков отдельных секций НЕМТ CGHV1J006D осуществлялось сквозными металлизированными отверстиями размерами 20×65 мкм и глубиной 100 мкм. Отсутствие описания конструкции гетероэпитаксиальной структуры (ГЭС) и линейной модели в DataSheet НЕМТ CGHV1J006D затрудняет понимание происходящих в нем электрофизических процессов токопереноса и то, как они связаны со статическими и СВЧ-характеристиками транзистора.

В связи с этим в настоящей работе представлена подобранная на основе расчетов конструкция гетероэпитаксиальной AlGaIn/GaN структуры и результаты разработанного на ее основе мощного AlGaIn/GaN НЕМТ сантиметрового диапазона с длиной затвора 0,3 мкм и шириной 1,2 мм, измерены его статические и СВЧ-характеристики, проведена оценка его мощностных характеристик, восстановлены параметры линейной модели.

Исследуемые в работе транзисторы (рис. 1) изготавливались на основе эпитаксиальных $Al_{30}Ga_{70}N/GaN$ гетероструктур выращенных МOCVD-методом на полуизолирующей подложке из карбида кремния 4H-SiC {0001} в ОАО «Элма-Малахит» г. Зеленоград, Москва. Конструкция гетероэпитаксиальной структуры была представлена слоями: верхний (капсулирующий) слой GaN имел толщину 2 нм, нижний легированный ($1,5 \times 10^{18}$ см⁻³) слой $Al_{30}Ga_{70}N$ – 14 нм, спэйсер $i-Al_{30}Ga_{70}N$ – 2,5 нм, слой AlN – 0,7 нм, буферный $i-GaN$ – 2500 нм. Расчет электрофизических и приборных характеристик ГЭС осуществлялся с использованием САПР Synopsys Sentaurus TCAD [3]. В отличие от аналога соединение истоков отдельных секций транзистора осуществлялось не металлизированными отверстиями, а более короткими двойными воздушными мостами. Концентрация электронов в двумерном (2D) электронном газе составляла $N_s = 1,34 \times 10^{13}$ см⁻², подвижность $\mu(T = 300$ К) = 1850 см²/(В×с), плотность дислокаций $< 10^8$ см⁻². Мегаизоляция активной области глубиной 70 нм формировалась реактивным ионным травлением по маске фоторезиста. Омические контакты стока и истока формировались методом взрывной литографии, напылением металлизации TiAlNiAu с по-

следующим отжигом в атмосфере азота при температуре 750 °С в течение 30 с. Длина канала сток-исток составляла 5 мкм, а длина Т-образного углубленного NiAu-затвора – 0,3 мкм.

Полная ширина затвора составляла 12×100 (мкм) = 1200 мкм (1,2 мм). Контакты истока соединялись между собой двойными воздушными мостами (см. рис. 1). Утонение подложки до 100 мкм осуществлялось методом динамической полировки. Для обеспечения теплоотвода на обратную сторону подложки напылялся слой золота Au толщиной 0,3 мкм. Разделение пластины на кристаллы осуществлялось дисковой резкой.

Измерения проводились на полуавтоматической зондовой станции Cascade 12000M с использованием векторного анализатора цепей PNA-X N5245A.

Измеренные выходные характеристики полученных HEMT представлены на рис. 2, а. Максимальное значение тока стока при полностью открытом транзисторе, измеренное в непрерывном режиме, составляет $I_{Dmax} \approx 750$ мА (в импульсном режиме $I_{Dmax} \approx 1,1$ А), максимальное удельное значение крутизны для импульсного режима $g_{max}(U_D = 10 \text{ В}) \approx 250$ мА/(В×мм), напряжение $U_{DSS} \approx 60$ В. Из частотной зависимости коэффициента усиления по мощности $G_{max} = G_{max}(f)$ видно (рис. 2, б), что предельное значение частоты f_i составляет ≈ 29 ГГц, а $f_{max} \approx 50$ ГГц. Усиление G_{SS} на частоте $f = 10$ ГГц составило ≈ 14 дБ.

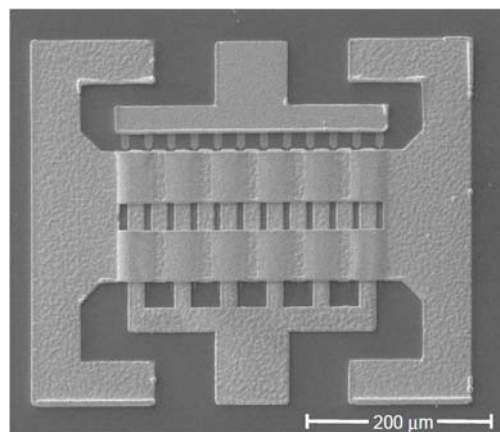


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение кристалла AlGaIn/GaN HEMT с длиной затвора 0,3 мкм и шириной 1,2 мм

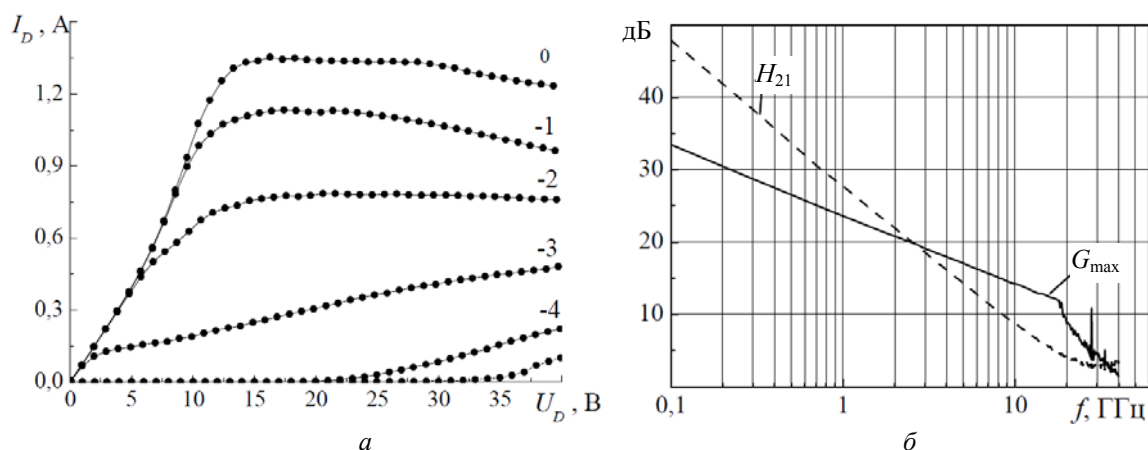


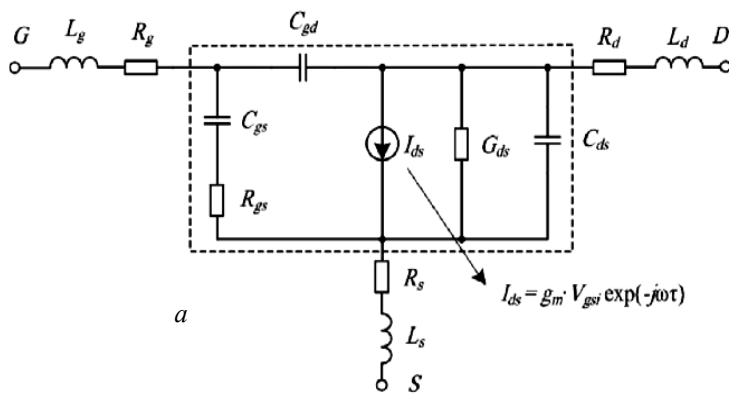
Рис. 2. Выходная характеристика AlGaIn/GaN HEMT, измеренная в импульсном режиме – а. Частотные зависимости коэффициента усиления по мощности $G_{max}(f)$ и по току $H_{21}(f)$ при $U_{ds} = 15$ В, $I_{ds} = 150$ мА и $U_g = -2,2$ В – б

Оценка мощностных характеристик осуществлялась по приближенной формуле (1) [4].

$$P_{out} = \frac{I_{Dmax}(U_{dss} - U_{ds})}{2} \quad (1)$$

Полагая $U_{dss} = 60$ В, а $U_{ds} = 10$ В, получим в непрерывном режиме $P_{out} \approx 6,8$ Вт.

Для понимания связи конструктивных элементов транзистора с параметрами его эквивалентной схемы было проведено восстановление значений параметров эквивалентной схемы его линейной модели. Экстракция параметров модели проводилась с использованием специализированного программного обеспечения [5]. Эквивалентная схема малосигнальной модели представлена на рис. 3, а. Элементы $L_g, L_s, L_d, R_g, R_s, R_d, C_{pd}$ и C_{pg} относятся к внешней части транзистора. К внутренней части (см. рис. 3, а, выделено пунктиром) относятся межконтактные ёмкости C_{gs}, C_{gd}, C_{ds} , сопротивление затвора R_i , сопротивление канала R_{ds} и внутренний источник тока с крутизной g_m и постоянной времени частотной зависимости источника тока t . На рис. 3, б представлены восстановленные значения параметров внутренней части транзистора. На рис. 4 представлено сравнение измеренных и смоделированных частотных характеристик исследуемого транзистора.



R_g , Ом	R_d , Ом	R_s , Ом	L_g , нГн	L_d , нГн
1,95	2,75	0,1	0,0681	0,0714

L_s , нГн	C_{gs} , пФ	C_{pd} , пФ	C_{gd} , пФ	C_{ds} , пФ
0,00664	0,221	0,0378	0,13	1,09

C_{ds} , пФ	g_m , См	R_{is} , Ом	R_{ds} , Ом	t , пс
0,52	0,178	2,04	230	1,94

б

Рис. 3. Эквивалентная схема малосигнальной модели транзистора T12×100 – а; значения параметров элементов внутреннего транзистора – б

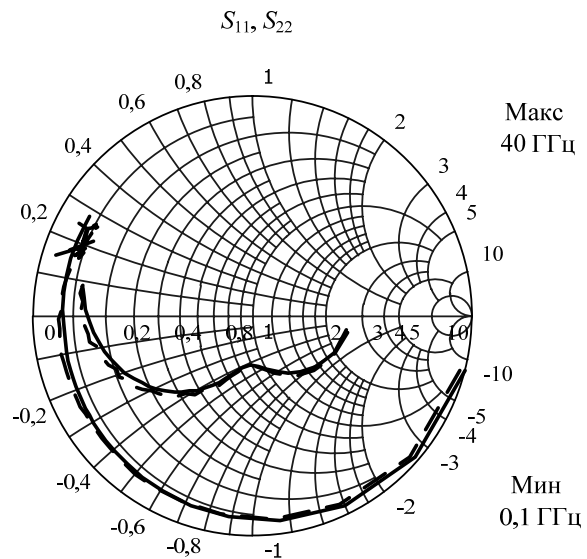
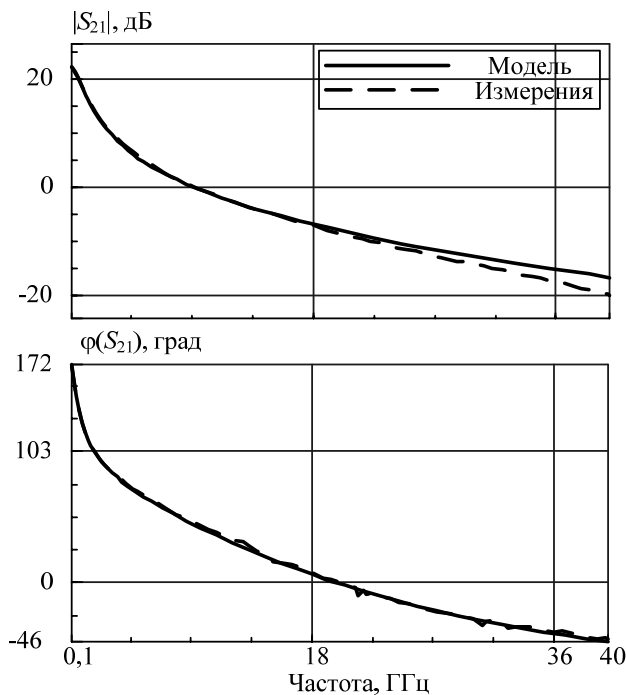


Рис. 4. Частотные зависимости S -параметров измеренного GaN-транзистора 12×100 мкм и полученной модели для режима $U_{ds} = 15$ В; $I_{ds} = 150$ мА; $U_{gs} = 2,2$ В

Таким образом, в результате проделанной работы была подобрана конструкция AlGaIn/GaN ГЭС на подложке из карбида кремния и на ее основе были разработаны и изготовлены мощные AlGaIn/GaN HEMT, по СВЧ-характеристикам близкие к аналогу CGHV1J006D производства компании Cree Inc. Кроме этого, были восстановлены параметры линейной модели изготовленного HEMT, что позволяет проследить связь электрофизических параметров гетероэпитаксиальных слоев с приборными характеристиками изготовленных AlGaIn/GaN HEMT.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по контакту № 02.G25.31.0091.

Литература

1. Thermal properties of indium nitride / S. Krukowski et al. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1998. – Vol. 59, № 3. – P. 289–295.
2. Cree corp. GaN HEMT CGHV1J006D Specification [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://download.siliconexpert.com/pdfs/2014/8/25/7/45/28/870/cree_manual/2cghv1j006d.pdf, свободный (дата обращения: 10.10.2014).
3. Радченко Д. Моделирование СВЧ-транзистора на основе эпитаксиальной структуры (HEMT) с помощью САПР Synopsys Sentaurus TCAD / Д. Радченко, К. Сбитнев, Н. Малеев // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. – 2009. – № 7–8. – С. 57–61.

4. AlGaN/GaN-СВЧ HEMT-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{\max} до 100 ГГц / В.Г. Мокеров и др. // Физика и техника полупроводников. – 2009. – №43(4). – С. 561–567.

5. Программное обеспечение для автоматизации измерений, деэμβеддинга и построения линейных моделей СВЧ-полевых транзисторов / И.М. Добуш и др. // Доклады ТУСУРа. – Томск: Изд-во ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24), ч. 2. – С. 99–105.

Торхов Николай Анатольевич

Вед. науч. сотрудник НИИ полупроводниковых приборов (НИИПП), Томск

Тел.: +7-952-807-49-98

Эл. почта: trkf@mail.ru

Божков Владимир Григорьевич

Д-р техн. наук, проф., нач. отд. НИИПП

Добуш Игорь Мирославович

Науч. сотрудник каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 41-47-17

Эл. почта: igadobush@gmail.com

Сальников Андрей Сергеевич

Мл. науч. сотрудник каф. КСУП

Тел.: +7 (382-2) 41-47-17

Эл. почта: ansalnikov@gmail.com

Бабак Леонид Иванович

Д-р техн. наук, директор НОЦ «Нанотехнологии», доц. каф. КСУП

Тел.: +7 (382-2) 41-47-17

Эл. почта: leonid.babak@rambler.ru

Torkhov N.A., Bozhkov V.G., Dobush I.M., Salnikov A.S., Babak L.I.

Powerful AlGaN/GaN HEMT- transistors X- and Ku-band

A powerful AlGaN/GaN high electron mobility transistor for X- and Ku-band is presented. Selected design heteroepitaxial structure layers of developed transistor parameters allow to achieve static and microwave performance closed to their foreign counterparts CGHV1J006D by Cree Inc. Unlike this transistor the presented one was carried out by shorter dual air bridges to connect separate transistor section instead of plated holes. Drain current in pulsed mode is $ID_{\max} = 1.1$ A, the breakdown voltage is 60 V, the small-signal gain at 10 GHz is $G_{SS} \approx 14$ dB. Estimation of the maximum output power in the pulsed mode is $P_{\text{sat}} \approx 6.8$ W. Unlike analog CGHV1J006D characteristics of the developed transistor were supplemented his small-signal model.

Keywords: AlGaN/GaN, HEMT, pulse microwave-static and power characteristics, linear model.