СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ AlGaIn/GaN СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ

© В. В. Груздов, К. Л. Енишерлова, Ю. В. Колковский

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

Рассмотрены три основных конструктивно-технологических варианта создания структуры электрода истока мощных полевых HEMT-транзисторов на основе AlGaIn/GaN/SiC. Проведён сравнительный анализ ёмкостных характеристик барьеров Шоттки систем «затвор-сток», «затвор-исток» этих транзисторов для рассматриваемых трёх вариантов, а также анализировались их вольт-амперные характеристики. Для транзисторов двух вариантов выявлено наличие пика неустойчивости ёмкости в диапазоне низких частот (10-200 кГц).

Ключевые слова: мощные полевые СВЧ транзисторы, гетероструктуры AlGaIn/GaN/SiC, полевые платы («field plates»), C-V характеристики, схемы замещения, дисперсия ёмкости, низкочастотные шумы

Сведения об авторах: Груздов Вадим Владимирович, к.э.н., профессор; Енишерлова Кира Львовна, д.т.н., enisherlova@pulsarnpp.ru; Колковский Юрий Владимирович, д.т.н., профессор, kolk@pulsarnpp.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF AlGaIn/GaN MICROWAVE TRANSISTORS

V. V. Gruzdov, K. L. Enisherlova, Yu. V. Kolkovskiy

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

Three basic methods of designing the source field plate of power AlGaIn/GaN/SiC-based HEMTs were investigated. Comparative analysis of gate-drain, gate-source Schottky barriers' capacitance characteristics was performed for all three transistor designs, and their current-voltage characteristic was analyzed. Two designs showed the presence of the peak of capacitance instability at low frequency range (10-200 kHz).

Keywords: power microwave field-effect transistors, AlGaIn/GaN/SiC heterostructures, field plates, C-V characteristics, equivalent circuit, capacitance dispersion, low-frequency noise

Data of authors: Gruzdov Vadim Vladimirovich, Ph.D., Prof.; Enisherlova Kira Lvovna, Sc.D., enisherlova@pulsarnpp.ru; Kolkovskiy Yuriy Vladimirovich, Prof., Sc.D., kolk@pulsarnpp.ru

Введение

В конструктивном решении мощных полевых СВЧ транзисторов на гетероструктурах AlGaIn/GaN/SiC [1-8] используют три основных топологических варианта формирования структуры истока вблизи активной области транзистора:

1. вариант А – металлизированные переходы на обратную сторону подложки от

области истока формируются непосредственно вблизи активной области прибора с максимальным приближением к областям истока; используются полевые платы («field plates»), максимально приближенные к металлизированным переходам на обратную сторону (рис. 1);

2. вариант В – металлизированные переходы на обратную сторону подложки

Рис. 1

Общий вид кристалла прибора варианта А (а) с выделенной крупным планом областью «С» (б): 1 – сток; 2 – затвор; 3 – вывод металлизации к истоку на обратную сторону кристалла; 4 – переходная площадка соединения «field plates» (FP) с истоком (плата FP находится непосредственно над Т-образным затвором); 5 – исток

Рис. 2

Общий вид кристалла прибора варианта В (а) с выделенной крупным планом областью «С» с полевыми платами («field plates») (б): 1 – исток; 2 – сток; 3 – затвор; 4 – «field plates». 3D фотография части прибора с контактными металлическими площадками (в): 5 – к области затвора; 6 – к области истока

вынесены из активной области прибора; присутствуют полевые платы; используется развитая система воздушных мостов (рис. 2);

3. вариант С – металлизированные переходы на обратную сторону подложки вынесены из активной области прибора, а уменьшение размеров прибора, как и в варианте В, достигается за счёт расположения вынесения сквозных отверстий на периферию кристалла; минимизированы зоны воздушных мостов; «field plates» не используются (рис. 3).

Следует отметить, что на характеристики СВЧ транзисторов, помимо конструктивных решений, безусловно, могут оказывать влияние особенности используемых технологических процессов, в частности, формирование активной области прибора может осуществляться либо с помощью ионной

имплантации (барьерный монокристаллический полупроводниковый слой AlGaIn вне активной области ионной имплантации превращается в диэлектрик), либо с помощью плазмо-химического травления [7].

Несмотря на возможное влияние используемых технологических процессов на получаемые результаты, проведение сравнительного анализа указанных трёх конструктивно-технологических вариантов формирования приборов представляет несомненный интерес, поскольку у этих трёх вариантов, по существу, разная электрическая схема замещения.

Цель работы и объект исследования

Целью данной работы явилось проведение сравнительного анализа указанных

Рис. 3

Общий вид кристалла прибора варианта С (а)
с выделенной крупным планом областью «С» (б):
1 – исток; 2 – сток; 3 – затвор; 4 – общая ширина к затворам.
3D фотография части прибора с «воздушными мостами» (в)

трёх вариантов (А, В и С) СВЧ транзисторов с использованием в качестве основного метода контроля измерения вольт-фарадных характеристик в широком диапазоне частот. Измерение вольт-фарадных характеристик продолжает оставаться наиболее эффективным методом контроля электрофизических особенностей AlGaIn/GaN/Si гетероструктур [10-12]. Метод даёт возможность получать информацию о величине заряда в канале, о наличии положительного или отрицательного заряда в барьерном слое, о концентрации свободных носителей в канале двумерного электронного газа (2DEG-канал). Высокая чувствительность этого метода к изменению распределения электрического заряда в активных областях структуры СВЧ транзистора позволяет лучше понять процесс формирования двумерного электронного газа, что крайне важно для понимания механизма таких явлений как коллапс тока, появление низкочастотных шумов, изменение высоты барьеров Шоттки в процессе работы СВЧ транзисторов.

Анализировались кристаллы мощных AlGaIn/GaN/SiC СВЧ транзисторов X-диапазона с длиной затвора 0,25-0,4 мкм, сформированные в условиях массового производства с учётом трёх указанных конструктивных вариантов – кристаллы группы А, В и С

(рис. 1-3). В качестве исходных использовались гетероструктуры с верхним не легированным слоем GaN толщиной 25-50 Å, в качестве барьерного слоя – нелегированные слои AlGaIn толщиной 200-220 Å при высоком молярном содержании алюминия (0,34-0,36), буферный слой – GaN толщиной 2-3 мкм эпитаксиальные слои формировались MOCVD технологией на подложках SiC с ориентацией рабочих поверхностей (0001). В качестве многослойной металлизации для создания омических контактов к областям стока и истока использовалась композиция Ti-Al-Mo-Au с толщинами слоёв 300-1000-400-1000 Å. В качестве диэлектрических пассивирующих слоёв использовались слои SiON с отношением кислорода и азота в пределах 10-20 %.

Измерения вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик проводились на установке CSM/WIN System в диапазоне частот от 1 кГц до 1 МГц при планарном расположении измерительных зондов на контактных окнах систем «затвор-исток» и «затвор-сток». Ёмкостные зависимости снимались как по параллельной (индекс-р), так и по последовательной (индекс-с) схемам замещения. Для каждого указанного конструктивно-технологического варианта исполнения приборов измерялось по 4-5 кристаллов.

Полученные результаты

На рис. 4 и 5 приведено семейство С-V-характеристик, полученных при измерении по последовательной схеме замещения барьеров Шоттки систем «затвор-исток» (рис. 4) и «затвор-сток» (рис. 5) кристаллов транзисторов анализируемых конструктивно-технологических вариантов А, В и С. Измерения проводились на частотах от 10 кГц до 1 МГц. Основные различия в полученных результатах для этих трёх вари-

антов были зафиксированы при измерении на низких частотах.

Так при измерении на частотах $f \leq 200$ кГц для приборов вариантов А и В наблюдалось возрастание ёмкости в зоне сильного обеднения ($U_{\text{смещ}} = -4 \div -5$ В), а на частоте $f \leq 50$ кГц у большинства кристаллов этих двух конструктивно-технологических вариантов практически отсутствовали типичные С-V характеристики – в области перехода от обогащения к обеднению ($U_{\text{смещ}} = -2 \div -3$ В) наблюдался пик возрастания величины

(а)

(б)

(в)

Рис. 4

Типовые С-V характеристики барьера Шоттки систем «затвор-исток» СВЧ транзисторов вариантов: а) А; б) В; в) С

Рис. 5

**Типовые C-V характеристики барьера Шоттки систем «затвор-сток»
СВЧ транзисторов вариантов: а) А; б) В; в) С**

ёмкости, причём с уменьшением частоты измерения высота пика возрастала (рис. 4б). Для варианта С только для системы «затвор-сток» при частоте $f = 10$ КГц было зафиксировано небольшое возрастание ёмкости с изменением величины напряжения смещения в сторону более низких отрицательных значений (рис. 5в), также для варианта С в указанном диапазоне частот возникновение неустойчивости (характерного пика) не наблюдалось, хотя для транзисторов всех трёх рассматриваемых конструктивных вариантов на C-V за-

висимостях фиксировалось наличие при $U_{\text{смещ}} = -2,8 \div -3,4$ В характерного перегиба (рис. 5в, точка «К»).

Обсуждение результатов

Анализ полученных вольт-ёмкостных характеристик трёх рассматриваемых вариантов транзисторов выявил следующие особенности:

– равенство величин максимальных ёмкостей при $U_{\text{смещ}} = 0$ при измерении по последовательной (C_s) и параллельной (C_p)

Ёмкостные параметры кристаллов СВЧ транзисторов

№	Конструкт.-технологический вариант	C-V – характеристики						I-V характеристики		Крутизна транзистора, мсим/мм
		БШ затвор-исток			БШ затвор-сток			Затвор-исток	Затвор-исток	
		C_s при $U_{смещ} = 0$ В, пФ	C_p при $U_{смещ} = 0$ В, пФ	Напряжение отсечки $U_{отс}$, В	C_s при $U_{смещ} = 0$ В, пФ	C_p при $U_{смещ} = 0$ В, пФ	Напряжение отсечки $U_{отс}$, В	Обратные токи при $U = -5$ В, А	Обратные токи при $U = -5$ В, А	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	«А»	5,4	5,2	$-3,5 \div -3,6$	5,4	5,5	$-3,4 \div -3,6$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$70 \div 100$
2		5,4	5,48		5,4	5,4		$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	
3		5,4	5,4		5,2	5,4		$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	
1	«В»	10,3	10,2	$-2,5 \div -3,0$	10,2	10	$-2,8 \div -3,0$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	
2		10,2	10,2		10	10,2		$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	
3		10	10		10	10		$8 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-7}$	
1	«С»	10	10	$-3,4 \div -3,8$	9,5	10	$-3,4 \div -3,8$	$2 \cdot 10^{-8}$	$45 \cdot 10^{-7}$	230
2		10	10		10	10		$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	

схемам измерения (табл., столбцы 3, 4 и 6, 7) свидетельствует о том, что для данных схем характерно малое последовательное активное сопротивление и высокое параллельное активное сопротивление барьерного слоя в цепи по сравнению с его реактивным сопротивлением, то есть барьерный слой AlGaIn функционирует как качественный диэлектрик и, кроме того, вклад дополнительных элементов структур незначителен;

– отсутствие дисперсии ёмкости в обогащении при ВЧ и НЧ измерениях (в измеряемом диапазоне частот C_s 1 МГц = C_s 10 кГц (рис. 4 и 5). Наличие дисперсии ёмкости может приводить к уменьшению выходных токов на затворе транзистора (эффект запаздывания на затворе). Как показано в [13], наличие дисперсии ёмкости ($\Delta C = C1$ кГц – $C1$ МГц) может быть связано как с влиянием ловушек на границе раздела AlGaIn-GaN в нитридных структурах, так и с релаксацией пьезоэ-

лектрических поляризационных напряжений в таких структурах при высокочастотных измерениях.

Это два положительных фактора. Но наличие характерного перегиба на C-V характеристиках для трёх рассматриваемых вариантов (рис. 4 и 5в, точка «К») свидетельствует о наличии какого-то дефекта на границе раздела AlGaIn-GaN, присутствие которого может сказаться на надёжности работы СВЧ транзисторов. Поскольку наличие такого характерного перегиба свойственно всем трём рассматриваемым вариантам, его появление, скорее всего, связано с особенностями принятого технологического цикла формирования области затвора приборов.

Появление пиков нестабильности в областях перехода от обогащения к обеднению, выявленное в ходе работы для СВЧ транзисторов вариантов А и В при измерении на низких частотах (рис. 4а, 5а, 4б и 5б), может приводить к появлению низкочастотных шумов. Возможно, появление

характерного пика в области перехода от обогащения в обеднение связано с наличием дополнительной границы верхнего нелегированного слоя i-GaN-AlGaIn при толщине верхнего слоя GaN более 50 Å. Появление аналогичного пика неустойчивости наблюдалось при анализе тестовых БШ, сформированных на гетероструктурах с верхним слоем GaN толщиной 50-70 Å [14]. Однако, выяснение причин появления низкочастотного пика неустойчивости ёмкости требует проведения дальнейших исследований.

Наличие больших обратных токов БШ как при V-I измерениях (табл., столбцы 9 и 10), так и рост величины ёмкости на C-V характеристиках в сильном обеднении ($U_{\text{смещ}} = -4 \div -5$ В) при измерении на низких частотах, особенно характерный для варианта транзисторов варианта А (рис. 4а), могут быть связаны с выведением металлизированных переходов на обратную сторону подложки от области истока непосредственно вблизи активных областей прибора. Однако для проверки указанных предположений необходимо проведение дальнейших исследований с использованием тестовых транзисторных структур с разной конструкцией структуры общего электрода к истоку, изготовленных в одном и том же технологическом процессе.

Выводы

Проведённый в данной работе сравнительный анализ трёх основных вариантов формирования структуры общего электрода истока мощных полевых СВЧ-транзисторов на гетероструктурах AlGaIn/GaN/SiC с измерением C-V характеристик в широком диапазоне частот выявило:

– наличие характерного перегиба на C-V характеристиках «затвор-исток» и «затвор-сток» для всех трёх рассматриваемых конструктивно-технологических вариантов;

– обнаружено наличие больших обратных токов при V-I измерениях для СВЧ транзисторов варианта А, что может быть связано с выведением металлизированных переходов на обратную сторону под-

ложки от области истока непосредственно вблизи активных областей прибора;

– установлено, что СВЧ транзисторы варианта С имеют наименьшие обратные токи и более стабильные C-V характеристики в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц.

Литература

1. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. СВЧ электроника на основе нитрида галлия – основное направление создания радиоэлектронных систем // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – № 2 (231). – С. 88-101.
2. Груздов В. В., Колковский Ю. В. Критические технологии – основное направление создания СВЧ радиоэлектронных систем // Материалы XIII научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 8-10 октября 2014, Дубна, с. 7-9.
3. Викулов И. GaN-микросхемы приёмопередающих модулей АФАР: европейские разработки // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – № 7. – С. 90-97.
4. Кишинский А. А. Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ диапазона – смена поколений // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 2.
5. Мокеров В. Г., Кузнецов А. Л., Федоров Ю. В. и др. AlGaIn/GaN-СВЧ HEMT-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{max} до 100 ГГц // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, № 4. – С. 561-567.
6. Jawad H. Qureshi, Marco J. Pelk, Mauro Marchetti et. al. // IEEE Transactions on microwave theory and technologies, 2009, vol. 57, № 8, 1925 p.
7. Okamoto N., Ohki T., Masuda S., Kanamura M. et. al. SiC Backside Via-hole process for GaN HEMT MMICs using high etch rate ICP Etching // CS MANTECH Conference, May 18-21, 2009, Tampa, Florida, USA.
8. Алексеев А., Красовицкий Дм., Петров С., Чалый В. Многослойные гетероструктуры AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn – основа новой компонентной базы твердотельной СВЧ-электроники // Компоненты и технологии. – 2008. – № 2. – С. 138-142.
9. Boutros K. S., Burnham S., Wong D., Shinohara K. et. al. // Proc. International Electron Device Meeting, 2009, 161 p.
10. Shengyin Xie, Jiayun Yin, Sen Zhang et. al. Trap behaviors in AlGaIn-GaN heterostructures by C-V

- characterization // Solid-State Electronics 53 (2009), pp. 1183-1185.
11. Зубков В. И. Диагностика гетероструктур с квантовыми ямами методом вольт-фарадных характеристик: разрывы зон, уровни квантования, волновые функции // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, № 3. – С. 331-337.
12. Arulkumaran S., Egawa T., Ishikawa H. et. al. Characterization of different –Al-content $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures and high-electron-mobility transistors on sapphire // Journal of Vacuum Science&Technology B21, 2003, № 2, pp. 888-894.
13. Yan Dawei, Wang Fuxue, Zhu Zhaomin et. al. Capacitance and conductance dispersion I AlGaN/GaN heterostructure // Journal of Semiconductors, 2013, vol. 34, № 1, pp. 014003-1 - 014003-4.
14. Енишерлова К. Л., Горячев В. В., Русак Т. Ф., Капилин С. А. Исследование влияния пассивирующих слоёв на ёмкостные характеристики гетероструктур AlGaN/GaN // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18. – С. 137-145.
- higher than 100 V and maximum oscillation frequency f_{max} up to 100 GHz // Физика и техника полупроводников [Semiconductor Physics and Engineering], 2009, T. 43, № 4, pp. 561-567.
6. Jawad H. Qureshi, Marco J. Pelk, Mauro Marchetti et. al. // IEEE Transactions on microwave theory and technologies, 2009, vol. 57, № 8, 1925 p.
7. Okamoto N., Ohki T., Masuda S., Kanamura M. et. al. SiC Backside Via-hole process for GaN HEMT MMICs using high etch rate ICP Etching // CS MANTECH Conference, May 18-21, 2009, Tampa, Florida, USA.
8. Alekseev A., Krasovitskiy Dm., Petrov S., Chaliy V. Multilayered AlN/AlGaN/GaN/AlGaIn heterostructures – the basis of a new component base of solid-state microwave electronics. *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technolog], 2008, № 2, pp. 138-142.
9. Boutros K. S., Burnham S., Wong D., Shinohara K. et. al. // Proc. International Electron Device Meeting, 2009, 161 p.
10. Shengyin Xie, Jiayun Yin, Sen Zhang et. al. Trap behaviors in AlGaIn-GaN heterostructures by C-V characterization // Solid-State Electronics 53 (2009), pp. 1183-1185.
11. Zubkov V. I. Analysis of heterostructures with quantum wells by the current-voltage characteristics: discontinuities, quantization levels, wave functions. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Engineering], 2007, T. 41, № 3, pp. 331-337.
12. Arulkumaran S., Egawa T., Ishikawa H. et. al. Characterization of different –Al-content $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructures and high-electron-mobility transistors on sapphire // Journal of Vacuum Science&Technology B21, 2003, № 2, pp. 888-894.
13. Yan Dawei, Wang Fuxue, Zhu Zhaomin et. al. Capacitance and conductance dispersion I AlGaIn/GaN heterostructure // Journal of Semiconductors, 2013, vol. 34, № 1, pp. 014003-1 - 014003-4.
14. Enisherlova K. L., Goryachev V. V., Rusak T. F., Kapilin S. A. Investigation of the influence of passivation layers on capacitance characteristics of AlGaIn/GaN heterostructures. *Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki* [News of Higher Education Institutions. Articles on Electronic Engineering], 2015, T. 18, pp. 137-145.

References

1. Gruzlov V. V., Kolkovskiy Yu. V., Minnebaev V. M. Microwave electronics based on gallium nitride – the main direction of the radioelectronic systems creation. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices], 2013, № 2 (231), pp. 88-101.
2. Gruzlov V. V., Kolkovskiy Yu. V. Critical technologies – the main direction of microwave radio-electronic system creation // *Materialy XIII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XIII scientific and technical conference «Solid-state electronics. Complex functional blocks of Radio-Electronic Equipment»], 8-10 October 2014, Dubna, pp. 7-9.
3. Vikulov I. GaN-microchips for APAA transceiver modules: European design. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Tecnology, Business], 2009, № 7, pp. 90-97.
4. Kishinskiy A. A. Wideband microwave transistor-based power amplifiers – Generation change. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Tecnology, Business], 2010, № 2.
5. Mokerov V. G., Kuznetsov A. L., Fedorov Yu. V. et. al. Microwave AlGaIn/GaN HEMTs with a breakdown