ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫХ СВЧ ИЗДЕЛИЙ

© В. В. Груздов, Ю. В. Колковский

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

В статье представлены результаты разработки единого технологического процесса создания изделий СВЧ электроники, применяемые в космической аппаратуре. Проведён сравнительный анализ физико-химических характеристик основных типов конструкции радиационно-стойких нитрид-галлиевых СВЧ приборов с использованием комплекса методов входного и технологического контроля.

Ключевые слова: радиационно-стойкие нитрид-галлиевые СВЧ приборы, единая технология, входной контроль, технологический контроль

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

RADIATION-HARDENED GALLIUM NITRIDE MICROWAVE TECHNOLOGY

V. V. Gruzdov, Y. V. Kolkovsky

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

In this paper, the results of uniform process development for the creation of space application microwave electronic devices are presented. Comparative analysis of physical and chemical characteristics of the main types of radiation-hardened gallium nitride microwave devices was performed, using a set of incoming and process inspection methods.

Keywords: radiation-hardened gallium nitride microwave devices, uniform process, incoming inspection, process inspection

Data of authors: Gruzdov Vadim Vladimirovich, Ph.D., Prof.; Kolkovsky Yury Vladimirovich, Sc.D., Prof., kolk@pulsarnpp.ru

Одним из основных направлений обеспечения тактико-технических характеристик перспективных радиоэлектронных систем является создание унифицированного ряда изделий СВЧ электроники – функционально законченных СВЧ модулей, обеспечивающих сочетание высоких энергетических характеристик с высокой функциональной сложностью, на основе новых полупроводниковых материалов, в частности нитрида галлия [1-4].

На протяжении последних 20 лет ведущие зарубежные фирмы Cree, Triquint

(США), Toshiba (Япония), UMS (Франция) интенсивно разрабатывают и производят СВЧ электронику на нитриде галлия, которая интенсивно внедряется в радиоэлектронные системы [5-6].

Начато внедрение электронных модулей на нитриде галлия в космическую аппаратуру. Запущенный в 2012 году Европейским космическим агентством (European Space Agency) и успешно функционирующий до настоящего времени спутник-ретранслятор X-диапазона PROBA-V

полностью оборудован радиационно-стойкой СВЧ электроникой на нитриде галлия.

В качестве основной методологии реализации унифицированного ряда СВЧ электроники предлагается единый технологический процесс создания СВЧ модулей и СВЧ радиоэлектронных систем от кристалла до конечного изделия (рис. 1) [7].

Реализация технологического процесса опирается на комплекс методов входного и технологического контроля радиационно-стойких нитрид-галлиевых СВЧ приборов на основе отечественных и за-

рубежных стандартов. Комплекс включает 10 методов входного контроля и 28 методов технологического контроля на основе измерения слоевого сопротивления, вольт-фарадных характеристик, оптических методов, методов эллипсометрии, растровой микроскопии, обеспечивающих пооперационный контроль (рис. 2) [8].

Использование комплекса методов контроля позволило провести сравнительный анализ физико-химических характеристик основных типов конструкции СВЧ транзисторов (рис. 3) [9].

Рис. 1

Единый технологический маршрут создания радиоэлектронной аппаратуры

Исходное сырьё	Гетерозитаксальная пластина ГЭСГАН -245-200-ТУ177560 -005-40363540-09 производитель АО «Элма-Малахит» Спецификация: $Al_{0.28}Ga_{0.72}N$ - 24 нм; AlN - 0.6 нм; GaN - S.I. - 2.2 - 2.4 мкм; $AlGaIn$ - зародышевый слой - 27 нм; S.I. SIC - 460 мкм			
Операция контроля	Входной контроль дефектов и неоднородностей гетерозитаксальных пластин	Технологический контроль дефектов и неоднородностей гетерозитаксальных пластин по значениям токов составных частей СВЧ транзисторов	Контроль статических параметров кристаллов СВЧ транзисторов	Контроль СВЧ параметров кристаллов транзисторов
	<p>Карта слоевого сопротивления</p> <p>Карта люминесценции</p> <p>Цветовое обозначение количества дефектов</p>	<p>Цветовое обозначение</p>		
Процент выхода годных на выборке 10 пластин с количеством кристаллов на пластине ~2000 шт.	80% (8 пластин)	60% ~12000 кристаллов	40% ~8000 кристаллов	35% ~7000 кристаллов

Рис. 2

Матрица пооперационного контроля мощных GaN СВЧ транзисторов с указанием процента выхода годных

Тип 1

Металлизированные переходы на обратную сторону подложки от области истока сформированы вблизи активной области прибора, используются полевые электроды «field plates», $U_{пр} = 130$ В

Тип 2

Металлизированные переходы на обратную сторону подложки вынесены из активной области прибора, используются полевые электроды «field plates», $U_{пр} = 110$ В

Тип 3

Металлизированные переходы на обратную сторону подложки вынесены из активной области прибора, полевые электроды «field plates» не используются, $U_{пр} = 90$ В

Рис. 3

Связь между конструкцией кристалла нитрид-галлиевого СВЧ транзистора, значением пробивных напряжений $U_{пр}$ и уровнем пиков ёмкости на C-V характеристиках барьера Шоттки

Сравнение показывает, что величина пиков ёмкости на C-V характеристиках барьера Шоттки затвора СВЧ транзисторов устойчиво коррелирует с уровнем спектральной плотности фазового шума $S_{\phi}(f)$ генераторов, собранных на этих транзисторах (рис. 4) [10].

Таким образом, можно утверждать, что конструкция нитрид-галлиевых СВЧ транзи-

сторов без использования полевых электродов «field plates» обеспечивает значение стабильности частоты излучаемых сигналов РЭС на 2÷3 порядка выше, чем конструкции, использующие полевые электроды.

Важнейшим требованием к изделиям СВЧ электроники, работающим в условиях космического пространства, является устой-

Рис. 4

Связь между уровнем спектральной плотности фазового шума $S_{\phi}(f)$ генераторов и C-V характеристиками барьера Шоттки нитрид галлиевого СВЧ транзистора

чивость к воздействию тяжёлых заряженных частиц.

Основным результатом воздействия тяжёлых заряженных частиц является накопление поверхностного заряда, приводящее к изменению напряжения затвор-исток, дополнительному открыванию транзистора и, как результат, снижению пробивного напряжения стока (рис. 5).

Проведённые исследования показывают, что при воздействии на нитрид-галлиевые СВЧ транзисторы факторов космического пространства оптимальной по критериям минимума фазового шума и максимума пробивных напряжений является конструкция, в которой присутствуют полевые электроды («field plates»), а заземляющие электроды вынесены от активной области транзистора на его периферию, что увеличивает пробивные напряжения без существенного увеличения плотности энергетических уровней, увеличивающих фазовый шум (тип 2).

Выводы

Представлены результаты использования комплекса методов входного и технологического контроля радиационно-стойких нитрид-галлиевых СВЧ приборов на основе отечественных и зарубежных стандартов.

Разработанные методы контроля позволили провести сравнительный анализ физико-химических характеристик основных

типов конструкции нитрид-галлиевых СВЧ транзисторов.

Установлена связь между конструкцией кристалла нитрид-галлиевого СВЧ транзистора, значением пробивных напряжений $U_{пр}$, уровнем пиков ёмкости на C-V характеристиках барьера Шоттки затвора СВЧ транзисторов и уровнем спектральной плотности фазового шума $S_{\phi}(f)$ генераторов, изготовленных на этих транзисторах.

Показано, что конструкция нитрид галлиевых СВЧ транзисторов без использования полевых электродов «field plates» обеспечивает значение спектральной плотности фазового шума генераторов, изготовленных на них, на $2 \div 3$ порядка ниже, чем у конструкций, использующих полевые электроды.

Установлено, что при воздействии на изделия нитрид галлиевой СВЧ электроники факторов космического пространства, снижающих уровень пробивных напряжений, необходимо оптимизировать конструкцию транзистора с целью повышения пробивных напряжений. В этом случае допустимо использовать конструкции с полевыми электродами, оптимизируя их по критериям минимума фазового шума и максимума пробивных напряжений (тип 2).

Литература

1. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. СВЧ электроника на основе нитрида галлия – основ-

Рис. 5

Вольт-амперная характеристика СВЧ транзистора при напряжении затвор-исток $U_{зи} = -5$ В: а) до испытаний на ТЗЧ; б) при воздействии ТЗЧ

- ное направление создания радиоэлектронных систем // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2013. – № 2 (231). – С. 88-101.
2. Колковский Ю. В., Миннебаев В. М. Применение GaN устройств в условиях космического пространства // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2014. – № 2 (233). – С. 20-25.
 3. Груздов В. В., Колковский Ю. В. Новые нитрид-галлиевые технологии для РЛС с АФАР // Интеграл. – 2015. – № 1-2. – С. 4-6.
 4. Груздов В. В., Колковский Ю. В. Приёмо-передающие нитрид-галлиевые СВЧ модули для РЛС // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. – 2015. – Вып. 3. – С. 163-174.
 5. Rudiger Quay Gallium Nitride Electronics // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, p. 469.
 6. Gallium Nitride (GaN). Physics, Devices, and Technology. Edited by F. Medjdoub, K. Iniewski // CRC Press electronics, 2016, 372 p.
 7. Груздов В. В., Колковский Ю. В. Нитрид-галлиевая электроника для космических систем // Радиопромышленность. – 2016. – № 3. – С. 54-58.
 8. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. – М.: Техносфера, 2016. – 328 с.
 9. Груздов В. В., Енишерлова К. Л., Колковский Ю. В. Сравнительный анализ AlGaIn/GaN СВЧ транзисторов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – № 2 (245). – С. 6-13.
 10. Груздов В. В., Енишерлова К. Л., Колковский Ю. В. и др. Влияние параметров барьеров Шоттки AlGaIn/GaN/SiC HEMT-транзисторов на фазовые шумы СВЧ генераторов // Известия вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22, № 5. – С. 460-470.
- Reference**
1. Gruzдов V. V., Kolkovsky 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. Ser. 2. Semiconductor devices], 2013, № 2 (231), pp. 88-101.
 2. Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. Application of GaN devices in space environment. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2014, № 2 (233), pp. 20-25.
 3. Gruzдов V. V., Kolkovsky Yu. V. New GaN technologies for APAR. *Integral*, 2015, № 1-2, pp. 4-6.
 4. Gruzдов V. V., Kolkovsky Yu. V. Microwave GaN transceiver modules for radar applications. *Voprosy radioelektroniki. Seriya obschetechnicheskaya* [Issues of Radio-Electronics. General Engineering Series], 2015, № 3, pp. 163-174.
 5. Rudiger Quay Gallium Nitride Electronics // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, p. 469.
 6. Gallium Nitride (GaN). Physics, Devices, and Technology. Edited by F. Medjdoub, K. Iniewski // CRC Press electronics, 2016, 372 p.
 7. Gruzдов V. V., Kolkovsky Yu. V. GaN electronics for space systems. *Radiopromyshlennost* [Radio industry], 2016, № 3, pp. 54-58.
 8. Gruzдов V. V., Kolkovsky Yu. V., Kontsevov Yu. A. *Kontrol novykh tekhnologiy v tverdotelnoy SVCH elektronike* [Inspection of new technologies in solid-state microwave electronics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016, 328 p.
 9. Gruzдов V. V., Enisherlova K. L., Kolkovsky Yu. V. Comparative analysis of AlGaIn/GaN microwave transistors. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2017, № 2 (245), pp. 6-13.
 10. Gruzдов V. V., Enisherlova K. L., Kolkovsky Yu. V. et al. Effect of AlGaIn/GaN/SiC HEMT Schottky barrier parameters on phase noise of microwave generators. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 2017, Vol. 22, no. 5, pp. 460-470.