

КОНТРОЛЬ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР В ТЕХНОЛОГИИ GaN СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ

© Ю. А. Концевой, Ф. И. Шамхалов

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

Рассматриваются методы входного и технологического контроля материалов и структур, применяющихся в технологии AlGaIn/GaN/SiC СВЧ транзисторов. Приведены особенности электрических, оптических, рентгеновских методов, методов растровой электронной микроскопии, методов катодолюминесценции, электронной Оже-спектроскопии, вторично-ионной масс-спектрометрии. Рассматриваются ограничения некоторых методов контроля.

Ключевые слова: AlGaIn/GaN/SiC СВЧ транзисторы, методы контроля параметров исходных гетероэпитаксиальных структур, методы контроля параметров омических контактов и барьеров Шоттки транзисторных структур

Сведения об авторах: Концевой Юлий Абрамович, д.т.н., профессор, kontsevov@pulsarnpp.ru; Шамхалов Фарид Имирасланович, д.э.н., профессор, shamhalov@pulsarnpp.ru

MATERIAL AND STRUCTURAL INSPECTION IN THE DESIGN OF GaN MICROWAVE TRANSISTORS

Yu. A. Kontsevov, F. I. Shamkhalov

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

This article considers the issues of incoming and process inspection of materials and structures used in AlGaIn/GaN/SiC microwave transistor design. Features of electrical, optical, X-ray, scanning electron microscopy, cathode luminescence, Auger electron spectroscopy and secondary-ions mass spectrometry methods are given. Limitations of several inspection methods are discussed.

Keywords: AlGaIn/GaN/SiC microwave transistor, methods of inspection of the initial heteroepitaxial structures' parameters, methods of inspection of ohmic contacts and Schottky barriers' parameters

Data of authors: Kontsevov Yuliy Abramovich, Sc.D., Prof., kontsevov@pulsarnpp.ru; Shamkhalov Farid Imiraslanovich, Sc.D., Prof., shamhalov@pulsarnpp.ru

Введение

Мощные высокотемпературные и радиационностойкие СВЧ транзисторы на широкозонных гетероструктурах нитрида галлия уже сейчас позволяют создавать новейшие перспективные радиоэлектронные системы гражданского и специального назначения. СВЧ транзисторы на нитриде галлия позволяют устранить основную причину,

сдерживающую создание твердотельных радиолокационных станций в диапазоне частот 8-12,5 ГГц, а именно: недостаточный уровень выходной мощности СВЧ транзисторов на основе арсенида галлия [1, 2].

Гетероструктуры AlGaIn/GaN выращиваются на карбиде кремния, на сапфире [1, 3] и на кремнии [4]. Однако наиболее распространённая технология – это техноло-

гия создания структур на карбиде кремния, что связано прежде всего с высокой теплопроводностью карбида кремния и минимальным расхождением параметров решётки карбида кремния и нитрида галлия [3].

Методы контроля материалов и структур в технологии GaN СВЧ транзисторов достаточно подробно изложены в [5, 6]. В [5] указано, что для многих методов контроля существует система стандартов. Основы стандартизации и технического регулирования с учётом опыта многих стран рассмотрены в [7].

В настоящей статье более детально рассмотрены достоинства и недостатки некоторых методов контроля и указаны их ограничения.

Контроль качества гетероструктур AlGa_xN/GaN/SiC

Для производства GaN СВЧ транзисторов в большинстве случаев используются гетероструктуры Al_xGa_(1-x)/GaN/SiC, где величина x обычно задаётся в пределах 0,25-0,35. При $x \leq 0,25$ уменьшается концентрация, а при $x \geq 0,35$ уменьшается подвижность двумерного газа электронов. Концентрацию, подвижность и поверхностное сопротивление двумерного газа лучше всего определять методом Ван-дер-Пау, который детально описан в [5]. Поверхностное сопротивление двумерного электронного газа нельзя определять обычным четырёхзондовым методом, например, при помощи аппаратуры типа ВИК УЭС 14А, детально описанной в [5, с. 105], так как верхний слой гетероструктур обычно является полуизолятором и имеет высокое удельное сопротивление, которое невозможно определить указанным зондовым методом.

Концентрацию x в слое Al_xGa_(1-x) можно определить рентгеновским методом [8], так как постоянная решётки слоя изменяется в зависимости от величины x , а также методом катодolumинесценции [9] при использовании растрового электронного микроскопа (РЭМ), снабжённого приставкой для определения катодolumинесценции [5, с. 244]. В этом случае концентрация x определяется по энергии пика собствен-

ной люминесценции структуры Al_xGa_(1-x). Однако аппаратура для контроля катодolumинесценции не позволяет проводить измерения на пластинах и для проведения измерений необходимо отрезать от пластины образцы небольших размеров. Кроме того, для исключения заряда поверхности электронами на пластину приходится наносить тонкий слой металла, что не позволяет рассматривать указанный метод как неразрушающий. Можно было бы освещать пластину жёстким ультрафиолетовым излучением, но интенсивности излучения ультрафиолетовых светодиодов недостаточно для возбуждения пиков собственной люминесценции Al_xGa_(1-x) структуры, а использование ультрафиолетовых лазеров усложняет и удорожает методику определения указанного параметра x .

Недостатки подложек из карбида кремния – это высокое содержание разнообразных дефектов, высокая плотность дислокаций и повышенная хрупкость. Кроме того, при последующих технологических операциях (утонение пластины с кристаллами, формирование сквозных металлизированных отверстий, соединяющих контакты истоков с подложкой) возникают трудности, которые отсутствуют при использовании кремниевых подложек.

Дефекты в пластинах карбида кремния контролируются поляризационным методом [3, 6]. Проведённые исследования показали, что некоторые пластины карбида кремния имеют такие дефекты, наличие которых полностью исключает дальнейшее применение этих пластин (рис. 1).

Примеры дефектов, выявленных в SiC оптическим методом и методом РЭМ, приведены на рис. 2. Аналогичным образом можно контролировать дефекты в гетероструктурах AlGa_xN/GaN.

В гетероструктурах имеется также большое число дефектов, создающих уровни на границе раздела слоёв гетероструктуры и в запрещённых зонах AlGa_xN и GaN. Эти уровни являются источником фотолюминесценции в видимой области спектра. В [5] и [10] приведены карты распределения жёлтой фотолюминесценции по площади



Рис. 1

Дефекты в пластине карбида кремния, выявленные поляризационным методом

гетероструктур AlGaN/GaN/SiC и AlGaN/GaN/Al₂O₃. Установлена корреляция между концентрацией центров жёлтой фотолюминесценции, сопротивлением и нелинейностью омических контактов СВЧ гетеротранзисторов. Показано, что чем выше уровень жёлтой фотолюминесценции, тем хуже параметры контактов истока и стока СВЧ гетеротранзисторов. Но, с другой стороны, в [11] показано, что в краевой области гетероструктур, где уровень жёлтой фотолюминесценции низкий, высока плотность дислокаций (известно, что дислокации создают каналы безызлучательной рекомбинации). Это противоречие требует проведения дальнейших исследований.

Контроль технологии GaN СВЧ гетеротранзисторов

В [5] перечислено 28 возможных методов технологического контроля, которые могут применяться в производстве GaN СВЧ гетеротранзисторов. Это контроль качества омических контактов и затворов транзисторов, включающий контроль образования фаз многослойной металлизации при создании омических контактов и контроль удельного сопротивления омических контактов после нанесения и термообработки металлических слоёв, контроль прямых и обратных вольт-амперных характеристик барьеров Шоттки, контроль вольт-фарадных характеристик барьеров Шоттки. В частности, в [12] при

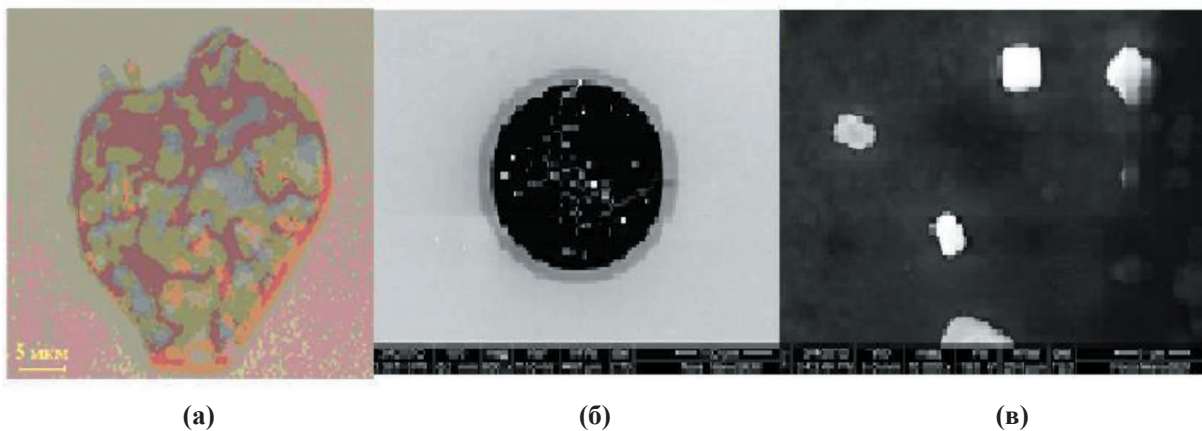


Рис. 2

Дефекты в SiC, выявленные под оптическим микроскопом (а) и при использовании РЭМ при увеличении 600 (б) и при увеличении 10000 (в)

ведены тестовые структуры и методики измерений, позволяющие более точно определять удельное сопротивление омических контактов. В [13] анализ микроструктуры изготовленных омических контактов проводился методами рентгеновской дифрактометрии (РД), электронной Оже-спектроскопии (ЭОС), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС).

Эллипсометрические методы применяются для контроля параметров и качества диэлектрических и металлизационных слоёв, для контроля толщины фоторезиста и распределения толщины фоторезиста по площади пластин, что важно для отработки технологии электронной литографии при изготовлении затворов гетеротранзисторов.

Методы ВИМС и Оже-спектроскопии используются для отработки процессов отжига омических контактов и полевых электродов, предназначенных для создания затворов. Однако эти полезные методы имеют тот недостаток, что позволяют проводить измерения только на образцах малых размеров порядка см². Многие вопросы требуют своего объяснения: например, неясно, почему первый слой титана после нанесения четырёхслойной металлизации Ti/Al/Mo/Au на гетероструктуру при отжиге при температуре порядка 800 °С проходит через слои молибдена, алюминия и золота и обнаруживается на поверхности металлизированного слоя омического контакта [13].

Не всё контрольно-измерительное оборудование, обеспечивающее реализацию перечисленных в [5] технологических методов контроля, имеется в группах входного и технологического контроля.

Выводы

Производство GaN СВЧ гетеротранзисторов является более сложным по сравнению с производством кремниевых полупроводниковых приборов и требует применения и отработки многочисленных методов входного контроля исходных материалов и структур и технологического контроля при производстве гетеротранзисторов.

В настоящем сообщении затронуты лишь некоторые вопросы, относящиеся к указанным проблемам. Здесь не затрагивались вопросы контроля параметров гетеротранзисторов и контроля их надёжности и радиационной стойкости. Эти вопросы требуют дальнейшего рассмотрения.

Литература

1. Васильев А. Г., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках. – М.: Техносфера, 2011. – 416 с., ил.
2. 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.
3. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия / Пер. с англ. Под ред. д.ф.-м.н. А. Г. Васильева. – М.: Техносфера, 2011. – 592 с., ил.
4. Nitride (GaN) / Physics, Devices, and Technology. Edited by Farid Medjdoub and Krzysztof Iniewski / CRC Press. 2003. Chapter 3, pp. 63-109.
5. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. – М.: Техносфера, 2016. – 328 с.
6. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. Входной и технологический контроль материалов и структур твердотельной СВЧ электроники. – М.: Техносфера, 2017. – 96 с.
7. Груздов В. В., Шамхалов Ф. И. Основы стандартизации и технического регулирования: учебное пособие. – М.: МЭСИ, 2011. – 184 с.
8. Енишерлова К. Л., Лютцау А. В., Темпер Э. М. Однокристалльная рентгеновская дифрактометрия гетероструктур. – М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2016. – 144 с., ил.
9. Kontsevov Yu. A., Pevtsov E. Ph., Khmelnskiy R. A., Kolkovsky Yu. V., Gruzдов V. V., Malykhin S. A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, V. 89, April 2017.
10. Гладышева Н. Б., Груздов В. В., Гусев М. Е., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А., Певцов Е. Ф. Контроль «жёлтой» фотолюминесценции гетероструктур AlGaIn // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 146-148.
11. Енишерлова К. Л., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А., Русак Т. Ф., Гусев М. Е. Влияние ультрафиолетового облучения на электрические и оп-

- тические свойства гетероструктур AlGaIn/GaN // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2016. – № 1 (240). – С. 37-46.
12. Корнеев В. И., Пашков М. В., Шамхалов Ф. И. Особенности контроля технологии создания омических контактов GaN СВЧ транзисторов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2017. – № 2 (245). – С. 14-17.
 13. Кондаков М. Н., Черных С. В., Черных А. В. и др. Исследование механизма формирования омического контакта на основе системы Mo/Al/Mo/Au к гетероструктуре AlGaIn/GaN // Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». – М.: АО «НПП «Пульсар», 2017. – С. 98-100.
 14. Корнеев В. И., Медведев Б. К., Пашков М. В. Технология омических контактов GaN СВЧ транзисторов // Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА». – М.: АО «НПП «Пульсар», 2017. – С. 155-157.
- References**
1. Vasilyev A. G., Kolkovsky Yu. V., Kontsevoy Yu. A. *SVCH pribory i ustroystva na shirokazonnykh poluprovodnikakh* [Microwave devices based on wideband-gap semiconductors]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011, 416 p.
 2. Gruzдов V. V., Kolkovsky Yu. V., Minnebaev V. M. Microwave electronics based on gallium nitride – the main direction of the radio-electronic systems creation. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2013, № 2 (231), pp. 88-101.
 3. Quay R. Gallium Nitride Electronics. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011, 592 p.
 4. Nitride (GaN) / Physics, Devices, and Technology. Edited by Farid Medjdoub and Krzysztof Iniewski / CRC Press. 2003. Chapter 3, pp. 63-109.
 5. Gruzдов V. V., Kolkovsky Yu. V., Kontsevoy Yu. A. *Kontrol novykh tekhnologiy v tverdotelnoy SVCH elektronike* [Inspection of new technologies in solid-state microwave electronics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016, 328 p.
 6. Gruzдов V. V., Kolkovsky Yu. V., Kontsevoy Yu. A. *Vkhodnoy i tekhnologicheskoy kontrol materialov i struktur tverdotelnoy SVCH elektroniki* [Incoming and process inspection of solid-state microwave electronics' materials and structures]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2017, 96 p.
 7. Gruzдов V. V., Shamkhalov F. I. *Osnovy standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya: uchebnoe posobie* [Fundamentals of standardization and process regulation: textbook]. Moscow, MESI Publ., 2011, 184 p.
 8. Enisherlova K. L., Lyuttsau A. V., Temper E. M. *Odnokristalnaya rentgenovskaya diffraktometriya geterostruktur* [Single-die X-ray diffractometry of heterostructures]. Moscow, JSC «S&PE «Pulsar», 2016, 144 p.
 9. Kontsevoy Yu. A., Pevtsov E. Ph., Khmelnitsky R. A., Kolkovsky Yu. V., Gruzдов V. V., Malykhin S. A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, V. 89, April 2017.
 10. Gladysheva N. B., Gruzдов V. V., Gusev M. E., Kolkovsky Yu. V., Kontsevoy Yu. A., Pevtsov E. F. Control of yellow photoluminescence in AlGaIn heterostructures. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki* [Materials of Electronic Technics], 2015, vol. 18, no. 2, pp. 146-148.
 11. Enisherlova K. L., Kolkovsky Yu. V., Kontsevoy Yu. A., Rusak T. F., Gusev M. E. Influence of ultraviolet illumination on the electrical and optical properties of the AlGaIn/GaN heterostructures. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2016, № 1 (240), pp. 37-46.
 12. Korneev V. I., Pashkov M. V., Shamkhalov F. I. Features of monitoring GaN microwave transistor's ohmic contact creation technology. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2017, № 2 (245), pp. 14-17.
 13. Kondakov M. N., Chernykh S. V., Chernykh A. V. et al. Investigation of Mo/Al/Mo/Au ohmic contact formation mechanism to AlGaIn/GaN heterostructures. *Materialy XV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XV Russian science and technical conference «Solid-state electronics. Complex functional blocks of radio-electronic equipment»]. Moscow, JSC «S&PE «Pulsar», 2017, pp. 98-100.
 14. Korneev V. I., Medvedev B. K., Pashkov M. V. GaN microwave transistors' ohmic contacts technology. *Materialy XV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika. Slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of XV Russian science and technical conference «Solid-state electronics. Complex functional blocks of radio-electronic equipment»]. Moscow, JSC «S&PE «Pulsar», 2017, pp. 155-157.