

**ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ
НА ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ
НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ AlGaN/GaN**

© 2016 г. В.Ю. ПАВЛОВ, А.Ю. ПАВЛОВ, А.В. ЗУЕВ,
Д.Н. СЛАПОВСКИЙ, Ю.В. ФЕДОРОВ

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, г. Москва

Введение

Полевые транзисторы на нитриде галлия, о создании которых впервые сообщили в начале 1993 года разработчики компании ARA Optics во главе с М.Ханом (M.Khan) [1], существенно расширили возможности приборов СВЧ-диапазона. Эти приборы способны работать в значительно более широком диапазоне частот и при более высоких температурах, а также с большей выходной мощностью по сравнению с приборами на кремнии, арсениде галлия, карбиде кремния или на любом другом освоенном в производстве полупроводниковом материале. Применение полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaN/GaN позволяет улучшить параметры приборов и устройств радиоэлектронных систем и расширить номенклатуру электронной компонентной базы. При столь перспективном рынке разработка и совершенствование нитридных технологий становятся приоритетными при выполнении исследовательских работ в области полупроводниковой техники.

Цель и задачи работы

По мере развития технологии роста наноразмерных гетероэпитаксиальных структур на основе GaN, позволяющие улучшить параметры материала (подвижность, концентрация основных носителей заряда) шло развитие технологических аспектов формирования приборов, в частности СВЧ полевого транзистора на GaN. Одним из важных этапов формирования СВЧ полевого транзистора является создание омического контакта, который влияет на частотные характеристики (граничная частота усиления по току и граничная частота усиления по мощности) и на технологичность последующих этапов изготовления транзистора. К омическим контактам предъявляется ряд требований, ужесточающихся с каждым годом развития мощной СВЧ силовой электроники на нитридах.

Цель работы: сравнить частотные характеристики полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaN/GaN с омическими контактами, изготовленными по сплавной и несплавной технологиям. Для этого необходимо измерить частотные характеристики на топологически одинаковых тестовых транзисторах, изготовленных по одному маршруту на идентичных гетероструктурах, отличающихся только этапом формирования омических контактов.

**Методы формирования омических контактов
к гетероструктурам AlGaN/GaN**

Контакт металл-полупроводник формируемый с использованием высокотемпературного быстрого термического отжига получил название сплавного омического контакта и нашел широкое применение в первых работах по полевым СВЧ транзисторам на гетероструктурах AlGaN/GaN.

Можно выделить два основных этапа формирования сплавных контактов к гетероструктуре AlGaN/GaN:

- Подбор системы металлизации – для создания омического контакта к полупроводникам n-типа на основе GaN чаще всего используются многокомпонентные контакты на основе Ti, образующие в процессе термообработки соединения с низкой работой выхода [2]. Наибольшее распространение получили системы Ti-Al-Ni-Au, Ti-Al-Ti-Au, Ti-Al-Mo-Au, Ti-Al-Ta-Au. Качественно итоговое удельное сопротивление омического контакта определяется отношением слоев Ti-Al, вышележащие слои определяют большей частью морфологию контакта. Низкое сопротивление омического контакта металл–GaN (до 10^{-6} – 10^{-7} Ом·см² при высоких концентрациях носителей в полупроводнике) [3] обычно связывают с образованием вакансий азота за счет взаимодействия GaN с материалом контакта, например Ti. Такие вакансии азота образуют нарушенный слой под контактом, играющий роль сильнолегированного слоя.

- Подбор режимов термической обработки – подбор температуры, времени отжига, а также кривой нагрева. Отжиг проводят в инертной среде.

Работы по созданию сплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN заключаются в основном в выборе композиции и экспериментальном исследовании влияния разных наборов композиции (по толщине слоев), либо влияние одного слоя композиции после стандартных термических обработок на конечное удельное контактное сопротивление и морфологию поверхности контакта (измерение шероховатости).

Создание несплавных омических контактов связывают с изменением свойств полупроводника, контактирующего с наносимой композицией металлизации, для изменения работы выхода из него: легирование защитного (контактного) слоя (проблема подзатворного удаления GaN) [4]; ионное легирование областей под омические контакты [5]; удаление полупроводника под контактом до уровня двумерного электронного газа с последующим ростом сильнолегированного GaN (доращивание n+ GaN) [6].

В институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН) используются обе технологии формирования омических контактов. Для оценки влияния омических контактов на частотные характеристики полевых транзисторов на AlGaIn/GaN были изготовлены тестовые транзисторы на однотипных гетероструктурах.

Изготовление тестовых полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaIn/GaN

Для изготовления полевого транзистора на гетероструктуре AlGaIn/GaN необходимо выполнение следующих ключевых этапов: формирование приборной изоляции за счет плазмохимического травления активных слоев гетероструктуры в местах электрического разрыва по полупроводнику; формирование омических контактов (либо сплавная, либо несплавная технологии); формирование затвора Шоттки, создание сложного профиля в резистивной маске, с последующим напыления металлизации выпрямляющего контакта; формирование пассивации активных областей, проходит в две стадии, плазмохимическое нанесение диэлектрической пленки, затем через резистивную маску удаление диэлектрика по рисунку пассивации.

При сплавной технологии использовалась классическая система металлизации омического контакта Ti/Al/Ni/Au со следующими толщинами 25/150/80/60 нм соответственно, термическая обработка проводилась при температуре 820°C в течении 20 сек в среде азота [7].

При несплавной технологии с доращиваемым n+ GaN предварительно формируется диэлектрическая маска, через которую осаждается методом молекулярной лучевой эпитаксии сильнолегированный GaN. Таким образом, создается сильнолегированным слой полупроводника под контактную металлизацию, которая не требует дополнительного высокотемпературного отжига [8].

Различные методы формирования омических контактов к гетероструктурам на основе GaN имеют как свои плюсы, так и недостатки. Сплавные методы формирования омических контактов простые в реализации, по сравнению с несплавными методами, которые требуют высокотехнологичного, прецизионного оборудования. При сплавных

методах получается развитый рельеф поверхности контактной металлизации, из-за высокотемпературного отжига, температуры отжига выше температуры плавления алюминия (рис. 1). По удельному контактному сопротивлению уступают несплавным методам в несколько раз. Удельное контактное сопротивление сплавных омических контактов Ti/Al/Ni/Au, получаемых в ИСВЧПЭ РАН, составляет 0,5 Ом·мм, удельное контактное сопротивление, полученное для несплавных дорасширяемых омических контактов, реализованных в ИСВЧПЭ РАН, составило 0.15 Ом·мм.

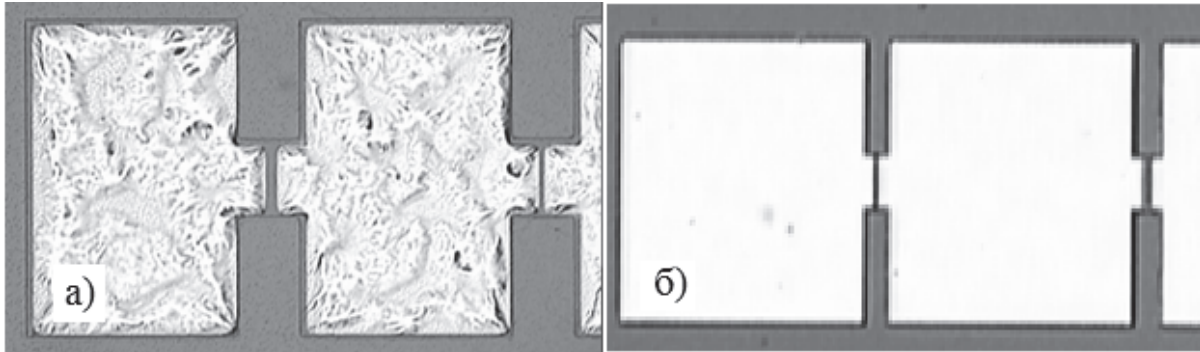


Рис. 1. Фотографии изображений поверхности сплавных а) и несплавных б) омических контактов, полученные в оптический микроскоп.

Внедрение технологии несплавных омических контактов позволит улучшить частотные характеристики транзисторов, за счет уменьшения сопротивления истока, улучшить технологичность их изготовления, уйти от проблем растекания и изменения размеров и формы сплавных омических контактов.

Результаты измерения тестовых транзисторов на гетероструктурах AlGaN/GaN

По отработанному маршруту изготовления транзисторов на гетероструктурах AlGaN/GaN, содержащему основные этапы описанные выше, были изготовлены тестовые транзисторы для проведения частотных измерений. В работе использовались гетероструктуры с одинаковыми толщинами активных слоев. Сравнивались транзисторы со сплавными и несплавными омическими контактами, имеющие два затвора шириной 50 мкм и длиной 0.12 мкм.

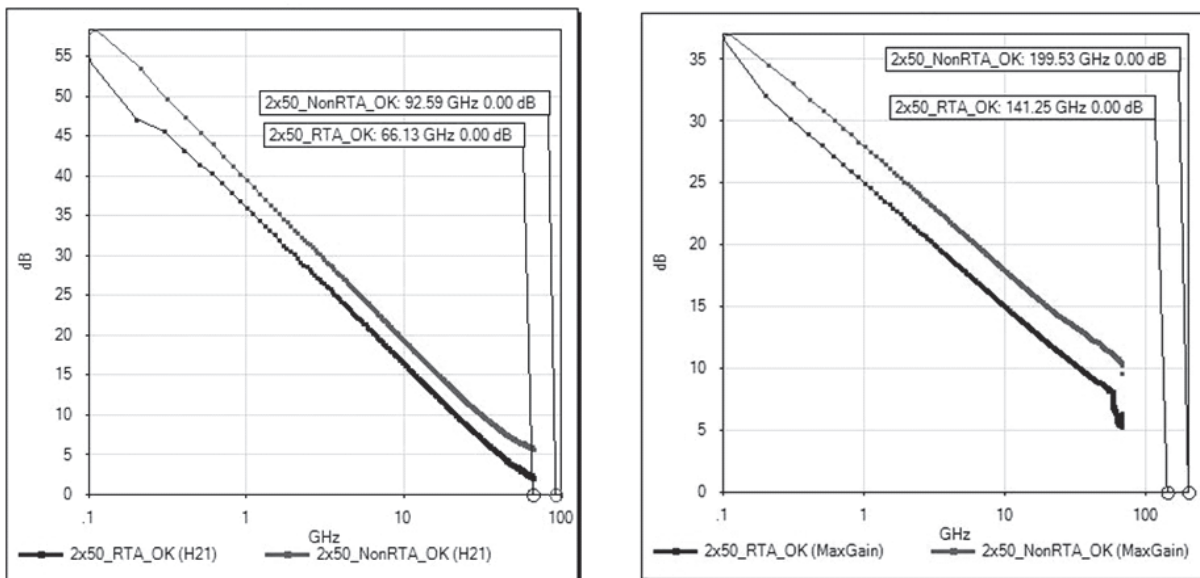


Рис. 2. Частотные характеристики тестовых транзисторов с суммарной шириной затвора 100 мкм и длиной 0.12 мкм, изготовленных со сплавными (RTA) и несплавными (NonRTA) омическими контактами.

Для оценки характеристик в СВЧ диапазоне использовался прецизионный векторный анализатор E8361A фирмы AgilentTechnologies, работающий в диапазоне 10 МГц – 67 ГГц. Результаты измерений граничной частоты усиления по току (F_t) и по мощности (F_{max}) для полученных полевых транзисторов показаны на рис. 2. Для транзисторов со сплавными омическими контактами F_t - 66,13 ГГц, F_{max} -141,25 ГГц, для транзисторов с несплавными омическими контактами F_t - 92,59 ГГц, F_{max} - 199,53 ГГц.

Показано, что вклад паразитного сопротивления истока полевого транзистора в выражение граничной частоты усиления по току приводит к заметному изменению ее значения, а так как граничная частота усиления по мощности является функцией от F_t , то и значение F_{max} при изменении удельного сопротивления омических контактов так же изменилось.

Заключение

Предложенная технология несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN позволяет получать удельное контактное сопротивление 0.15 Ом·мм, что не уступает мировым аналогам. Использование данной технологии позволило уменьшить удельное контактное сопротивление в разы по сравнению с используемой ранее сплавной технологией формирования омических контактов. Что в конечном счете сказалось на параметрах полевого транзистора. Крутизна транзистора выросла, измерения частотных характеристик показали улучшение граничной частоты усиления по току и по мощности для полученных полевых транзисторов с несплавными омическими контактами (F_t - 92,59 ГГц, F_{max} - 199,53 ГГц.) и показали рекордные значения в данной области в России.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.604.21.0136, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60414X0136).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khan M.A., Kuznia J.N., Bhattaral A.R., Olsen D.T. Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN. - Appl.Phys.Lett. - 1993, v.62 (15), p. 1786-1787.
2. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Механизмы протекания тока в омических контактах металл—полупроводник. Обзор. ФТП. - 2007. Т. 41, №11. с. 1281-1308.
3. Morkoc H., Strike S., Gao G.B., Lin M.E., Sverdlov B., Burns M. J. Appl. Phys. - 1994, 76(3), 1363.
4. Wong M., Pei Y., Palacios T., Shen L., Chakraborty A., McCarthy L., Keller S., DenBaars S., Speck J.S., Mishra U.K. Low nonalloyed Ohmic contact resistance to nitride high electron mobility transistors using N-face growth. Appl. Phys. Lett. - 2007, 91, 232103.
5. Recht F., McCarthy L., Rajan S., Chakraborty A., Poblenz C., Corrión A., Speck J.S., Mishra U.K. Nonalloyed ohmic contacts in AlGaIn/GaN HEMTs by ion implantation with reduced activation annealing temperature. IEEE Electron Device Letters. - 2006, 27(4), p. 205-207.
6. Pang L., Kim K. Analysis of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with nonalloyed Ohmic contacts achieved by selective area growth using plasma assisted molecular beam epitaxy. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). - 2014, 04 (02), p. 08-13.
7. Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Федоров Ю.В. Влияние технологических приемов на морфология и сопротивление омических контактов к гетероструктурам на основе GaN. «Мокеровские чтения». 5-я Научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 21–22 мая 2014 г.: тезисы докладов. М.: НИЯУ МИФИ, 2014., с. 27-28.
8. Арутюнян С.С., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Томаш К.Н., Федоров Ю.В. Двухслойная диэлектрическая маска Si₃N₄/SiO₂ для создания низкоомных омических контактов к AlGaIn/GaN HEMT. ФТП. - 2016. Т 50, №. 8, с. 1138-1142.