

07

## Термическая стабильность несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN

© А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, Д.Н. Слаповский

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,  
Москва  
E-mail: p.alex.ur@yandex.ru

Поступило в Редакцию 14 июня 2017 г.

Представлены результаты исследования деградации несплавных омических контактов с эпитаксиально-дорастиваемым сильнолегированным GaN к гетероструктурам с двумерным электронным газом (ДЭГ). Исследовалось изменение значения относительного удельного контактного сопротивления при температурах до 600°C для металлизаций Ti/Pd/Au, Cr/Au и Cr/Pd/Au. Наилучшую стойкость к температурным воздействиям показал состав металлизации Cr/Pd/Au, сопротивление которого уменьшалось при рабочих температурах 400°C. Впервые продемонстрировано, что наибольший вклад в увеличение значения контактного сопротивления к ДЭГ при нагреве выше 400°C вносит сопротивление структуры металл–полупроводник (Cr/Pd/Au- $n^+$ -GaN), при этом при температурах 400°C и выше происходит уменьшение значения сопротивления между сильнолегированным GaN и ДЭГ.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.22.45267.16917

Гетероструктуры AlGaN/GaN постепенно занимают место в сверхвысокочастотной (СВЧ) полупроводниковой электронике, заменяя элементную компонентную базу, сформированную на гетероструктурах на основе GaAs, как материал с большой шириной запрещенной зоны и высокой концентрацией основных носителей заряда, обеспечивающий работу приборов на его основе при больших температурах и с большей выходной мощностью. В России продемонстрирована принципиальная возможность создания отечественной элементной компонентной базы диапазона частот до 100 GHz на нитридных структурах [1,2]. При изготовлении данных СВЧ монолитных интегральных схем (МИС) были использованы несплавные омические контакты, интерес к которым

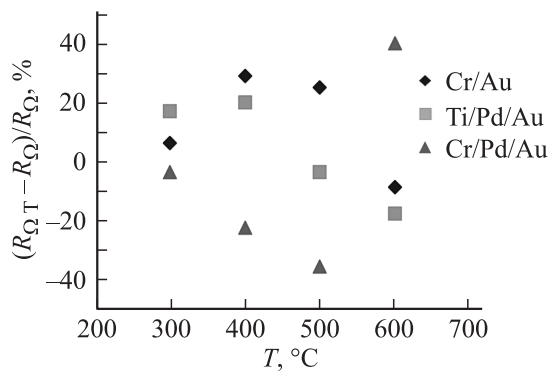
возрос в связи с необходимостью увеличения рабочего диапазона частот схем. Несплавные омические контакты за счет отсутствия высокотемпературной обработки после нанесения состава металлизации контакта позволяют сохранить гладкий рельеф и ровную границу омических контактов полевого транзистора в схеме. Это позволяет формировать метки для электронно-лучевой литографии в одном слое с металлизацией контактов, что обеспечивает лучшее вписывание полевого транзистора между омическими контактами полевого транзистора, расстояние между которыми может составлять несколько микрометров. При этом удельное контактное сопротивление несплавных омических контактов в несколько раз меньше, чем для сплавных омических контактов, что является дополнительным плюсом их внедрения [3].

Использование несплавных методов формирования омических контактов к гетероструктурам AlGaN/GaN требует дополнительных исследований для оценки изменения их характеристик в зависимости от внешних факторов, таких как температура. В процессе изготовления приборов и их работы контакт металл–полупроводник греется и может менять свои свойства. При сплавной технологии формирования омических контактов они подвергаются высокотемпературной обработке и обладают большей термостабильностью, чем несплавные. В качестве контактной металлизации без термической обработки в несплавных методах используют композиции Ti/Au и Cr/Au. Для предотвращения миграции золота через контактный слой Ti(Cr) в полупроводник, происходящей при нагреве, в состав омического контакта вводят слой платины или палладия, обеспечивающий лучшую термостабильность несплавных омических контактов до температур 350–400°C. Использование в качестве контакта к сильнолегированному GaN состава металлизации традиционной сплавной композиции Ti/Al/Ti/Au после осаждения позволяет получать низкое значение удельного контактного сопротивления, но при нагреве данного состава до 300–400°C появляется неомичность контакта металл–полупроводник, характеризующаяся нелинейной вольт-амперной характеристикой [4,5]. Поскольку СВЧ МИС в процессе изготовления проходят технологические операции с температурой процесса 300–350°C, использование состава металлизации традиционной сплавной композиции Ti/Al/Ti/Au без сплавления не имеет смысла.

В связи с этим появилась задача определить диапазон температур использования несплавных омических контактов разного состава к

эпитаксиально-дорасчиваемому сильнолегированному GaN под металлизацией омического контакта, селективно осажденного через предварительно сформированную диэлектрическую маску в процессе изготовления СВЧ МИС и их эксплуатации. Необходимо оценить деградацию несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN при температурах до 400°C и выше за счет оценки изменения удельного сопротивления омического контакта к двумерному электронному газу (ДЭГ) гетероструктуры.

Для исследования термической стабильности несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN с разным составом металлизации омического контакта применялись структуры, выращенные на подложках сапфира методом химического осаждения из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений без защитного слоя, с открытым барьером. Оценка влияния термического воздействия на сопротивление омического контакта проводилась с помощью формируемых на гетероструктурах тестовых элементов, реализующих метод длинной линии (LTLM — linear transmission line method) и представляющих собой набор контактных площадок шириной 20  $\mu\text{m}$ , расположенных друг от друга на расстоянии, различающемся в 2 раза, зазоры между контактными площадками составляли: 2, 4, 8 и 16  $\mu\text{m}$ . Для получения тестовых элементов необходимо выполнение следующего порядка технологических операций [6]. Первоначально на гетероструктурах AlGaIn/GaN формируется приборная изоляция, плазмохимическим травлением через фоторезистивную маску удаляются активные слои гетероструктуры в хлорсодержащей среде до глубины порядка 70 nm. Затем формируется диэлектрическая маска со вскрытыми окнами в местах контакта металлической композиции к полупроводнику, через которую перед ростом сильнолегированного GaN проводится плазмохимическое травление гетероструктуры в хлорсодержащей плазме до уровня или ниже уровня ДЭГ [7]. Методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии осуществляется селективный рост сильнолегированного GaN на гетероструктуре с изготовленной маской; таким образом, в местах будущего омического контакта формируется сильнолегированный полупроводник. Удаление диэлектрической маски происходит жидкостным химическим травлением в растворе на основе плавиковой кислоты. На гетероструктуру с участками сильнолегированного GaN через двухслойную фоторезистивную маску методом вакуумного тер-



**Рис. 1.** Зависимость изменения удельного контактного сопротивления ( $R_{\Omega T}$ ), измеренного после нагрева, относительно первоначального ( $R_{\Omega}$ ) от температуры.

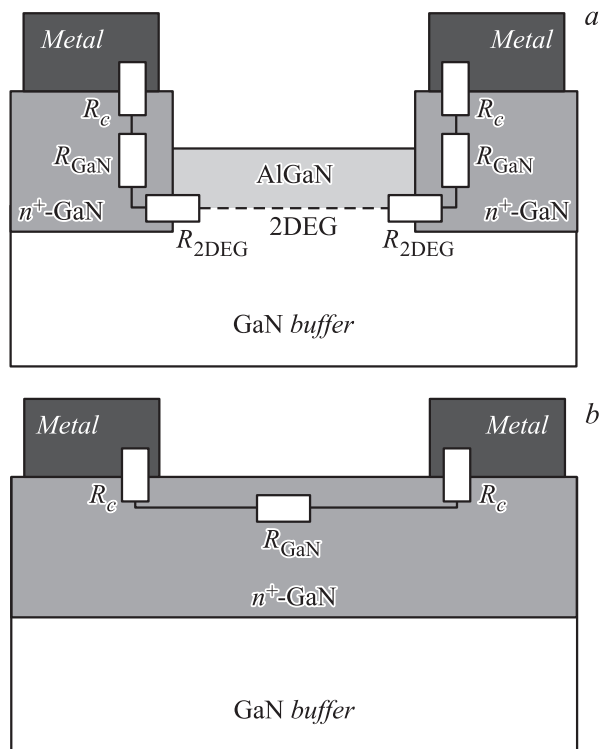
мического (резистивного) нанесения без нагрева осаждается контактная металлизация необходимого состава.

Для сравнения термостабильности несплавных омических контактов к гетероструктурам AlGaIn/GaN с дорачиванием сильнолегированного GaN были исследованы следующие составы металлизации: Ti/Pd/Au, Cr/Au и Cr/Pd/Au. Титан и хром выбраны в качестве контактных слоев металлизации к полупроводнику, палладий введен как диффузионный барьер, а Au — как защитный химически неактивный верхний контактный слой к металлизации омического контакта.

Образцы с тестовыми структурами и разными составами металлизаций подвергались одновременному нагреву в установке быстрого термического отжига STE RTA79 от 300 до 600 °C с шагом 100 °C в течение 15 min в инертной среде азота. До и после термического воздействия на каждом образце оценивалось удельное контактное сопротивление омических контактов для определения его изменения относительно первоначального значения. Поскольку образцы изготавливались на разных пластинах и брались из разных частей пластины, то оценивалось относительное изменение удельного контактного сопротивления каждого образца. Для каждого температурного воздействия использовался ранее не подвергавшийся нагреву образец. Результаты в виде зависимости изменения удельного контактного сопротивления

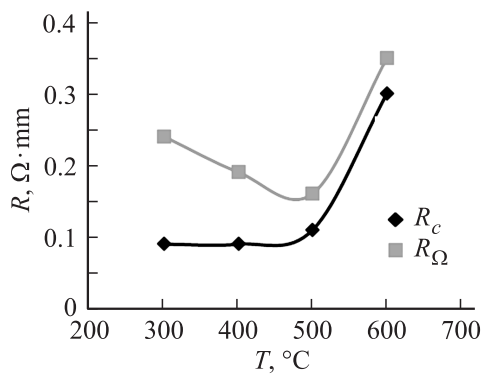
относительно первоначального значения от температуры представлены на рис. 1. Из зависимостей видно, что значения удельных контактных сопротивлений омических контактов с составами металлизации Cr/Au и Ti/Pd/Au при нагреве до 400°C увеличиваются относительно измеренного сопротивления при комнатной температуре, а омических контактов с составом Cr/Pd/Au практически не изменяются. Но при нагреве выше 400°C мы наблюдаем обратную картину: значения сопротивления для металлизаций всех составов уменьшаются.

При измерении удельного контактного сопротивления методом длинной линии общее измеряемое контактное сопротивление к каналу гетероструктуры включает в себя следующие составляющие  $R_{\Omega}$ : сопротивление металл–полупроводник Cr/Pd/Au– $n^+$ GaN ( $R_c$ ), сопротивление сильнолегированного эпитаксиально-доращиваемого полупроводника GaN ( $R_{\text{GaN}}$ ) и сопротивление между сильнолегированным GaN и двумерным электронным газом ( $R_{2\text{DEG}}$ ), что схематически показано на рис. 2. Для оценки вклада каждого сопротивления в итоговое удельное контактное сопротивление несплавленного омического контакта к гетероструктуре AlGaIn/GaN в тестовый модуль образца дополнительно были введены аналогичный тест метода длинной линии к сильнолегированному GaN ( $R_c$ ), эпитаксиально-доращиваемому на буферный слой гетероструктуры, и тест удельного сопротивления сильнолегированного полупроводника ( $R_{\text{GaN}} = 100 \Omega / \square$ ). Таким образом, при вычитании из измеренного значения общего удельного контактного сопротивления к гетероструктуре AlGaIn/GaN измеренного значения удельного контактного сопротивления к сильнолегированному GaN оценивается удельное контактное сопротивление к двумерному электронному газу гетероструктуры ( $R_{2\text{DEG}} \approx R_{\Omega} - R_c [\Omega \cdot \text{mm}]$ ). Используя данные тесты, можно оценить изменение каждого сопротивления при термическом воздействии на несплавленный омический контакт и увидеть, какое из составляющих сопротивлений наиболее деградирует при нагреве. Для термического воздействия на данные тесты использовалась контактная металлизация Cr/Pd/Au. Образцы с тестами нагревались при температурах 300, 400, 500, 600°C в течение 15 min в среде азота аналогично первому эксперименту. После каждого нагрева измерялись удельные контактные сопротивления  $R_{\Omega}$  и  $R_c$ . Результаты измерений представлены на рис. 3. В результате проведенного эксперимента видно, что при нагреве несплавных омических контактов с эпитаксиально-доращиваемым сильнолегированным GaN происходит рост удель-



**Рис. 2.** Схема тестового элемента для определения значения удельного контактного сопротивления к гетероструктуре AlGaN/GaN (a) и сильнолегированному GaN (b) в разрезе.  $R_c$  — сопротивление металл-сильнолегированный GaN,  $R_{\text{GaN}}$  — сопротивление сильнолегированного GaN,  $R_{2\text{DEG}}$  — сопротивление между сильнолегированным GaN и двумерным электронным газом.

ного контактного сопротивления структуры металл–полупроводник Cr/Pd/Au– $n^+$ GaN ( $R_c$ ), что согласуется с экспериментальными данными из зарубежной литературы [4,5] и объясняется миграцией золота при нагреве к границе металл–полупроводник с последующей диффузией золота в GaN. При этом измеряемое удельное сопротивление на тесте омического контакта к гетероструктуре с ДЭГ уменьшалось, что



**Рис. 3.** Зависимость удельного контактного сопротивления к сильнолегированному GaN  $R_c$  и к гетероструктуре AlGaIn/GaN ( $R_{\Omega}$ ) от температуры.

свидетельствует об уменьшении сопротивления между сильнолегированным GaN и ДЭГ, так как в тех же условиях и на том же образце сопротивление металл–полупроводник увеличивалось. Сопротивление между сильнолегированным GaN и ДЭГ при температуре отжига 300  $^{\circ}\text{C}$  составляло около 0.15  $\Omega \cdot \text{mm}$ , а после отжига при температурах выше 500  $^{\circ}\text{C}$  — 0.05  $\Omega \cdot \text{mm}$ . При больших значениях сопротивления между сильнолегированными GaN и ДЭГ его можно минимизировать за счет предварительного нагрева гетероструктуры со сформированным сильнолегированным GaN перед операцией формирования контактной металлизации несплавных омических контактов. По зарубежным данным теоретический предел сопротивления к ДЭГ для GaN-HEMT составляет менее 0.02  $\Omega \cdot \text{mm}$  [8].

Таким образом, в результате термических воздействий на несплавные омические контакты с эпитаксиально-доращиваемым сильнолегированным GaN к гетероструктурам AlGaIn/GaN наилучшую термостабильность показал состав металлизации Cr/Pd/Au, позволяющий использовать этот состав без изменения контактного сопротивления до температуры 400  $^{\circ}\text{C}$ , являющейся максимально используемой в технологическом цикле изготовления СВЧ МИС. Для всех исследуемых композиций состава металлизации было замечено изначальное увеличение значения удельного контактного сопротивления, но

после 400–500°С происходило его незначительное уменьшение по отношению к первоначальному значению. Так же для омического контакта к гетероструктуре с ДЭГ с составом металлизации Cr/Pd/Au было установлено, что при нагреве свыше 400°С на фоне улучшения общего контактного сопротивления происходит деградация контактного сопротивления металл–полупроводник за счет миграции золота в сторону полупроводника через диффузионный барьер (Pd). Эффект уменьшения контактного сопротивления к ДЭГ при температурах выше 400°С был не прогнозируемым, так как в зарубежной литературе в основном исследовалась деградация несплавных омических контактов, сформированных непосредственно на сильнолегированном GaN.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0124, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0124).

## Список литературы

- [1] Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Бугаев А.С. и др. // Микроэлектроника. 2016. Т. 45. В. 2. С. 135–143.
- [2] Михайлович С.В., Галиев Р.Р., Зуев и др. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 45. В. 16. С. 9–14.
- [3] Павлов В.Ю., Павлов А.Ю. // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. В. 10. С. 635–644.
- [4] Lee M.L., Sheu J.-K., Hu C.C. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 182106.
- [5] Chang Z., Shu-Ming Z., Hui W. et al. // Chin. Phys. Lett. 2012. V. 29. N 1. P. 017301.
- [6] Павлов В.Ю., Павлов А.Ю., Слаповский Д.Н. и др. // Тез. докл. 11-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“. 2017. С. 132–133.
- [7] Арутюнян С.С., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю. и др. // ФТП. 2016. Т. 50, В. 8. С. 1138–1142.
- [8] Guo J., Li G., Faria F. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2012. V. 33. N 4. P. 525-527.