

# Низкотемпературные омические контакты на основе Ta/Al к гетероэпитаксиальным структурам AlGaN/GaN на кремниевых подложках

© Е.В. Ерофеев<sup>1</sup>, И.В. Федин<sup>1</sup>, В.В. Федина<sup>1</sup>, А.П. Фазлеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт систем электрической связи  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники,  
634034 Томск, Россия

<sup>2</sup> АО «Научно-производственная фирма „Микран“»,  
634045 Томск, Россия

E-mail: erofeev@sibmail.com

(Получена 16 апреля 2018 г. Принята к печати 23 апреля 2018 г.)

Исследованы закономерности формирования низкотемпературного омического контакта на основе Ta/Al к гетероэпитаксиальным структурам Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N/GaN на кремниевых подложках. Получены омические контакты на основе композиции Ta/Al/Ti (10/300/20 нм), характеризующиеся низким значением приведенного контактного сопротивления (0.4 Ом · мм), а также гладкой морфологией поверхности контактной площадки и ее края после термической обработки при  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60$  с в среде азота.

DOI: 10.21883/FTP.2019.02.47108.8870

## 1. Введение

Мощные транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия (GaN) представляют большой интерес с точки зрения полупроводниковой СВЧ электроники [1]. Благодаря уникальным свойствам GaN, транзисторы на его основе имеют большие напряжения пробоя и плотности токов, что позволяет достичь плотность мощности, в 10 раз превышающую таковую у кремниевых и арсенид-галлиевых аналогов [2]. Однако для достижения высоких рабочих характеристик требуются низкорезистивные омические контакты к областям стока и истока GaN-транзистора. Кроме того, необходимо, чтобы омические контакты имели гладкую морфологию поверхности и ровный край, обеспечивающие возможность формирования субмикронных Т-образных затворов GaN-транзисторов методами электронно-лучевой литографии. Таким образом, исследования, направленные на изучение закономерностей формирования омических контактов к AlGaN/GaN-гетероструктурам, являются актуальными и практически значимыми.

В настоящее время наиболее распространенным омическим контактом к гетероэпитаксиальным структурам AlGaN/GaN является многослойная металлизация на основе Ti/Al/Ni/Au [3–5]. Нижний слой Ti, непосредственно контактирующий с полупроводником с образованием соединений TiN в процессе термической обработки, играет значительную роль в формировании низкорезистивного омического контакта. Слой Al в свою очередь, реагируя с Ti в процессе отжига, способствует формированию фаз Al<sub>3</sub>Ti, предотвращая окисление Ti [6,7]. Слой Ni выступает в качестве диффузионного барьера, препятствующего взаимодействию слоя Al с вышележащим слоем Au, выполняющим защитную функцию. При этом вместо Ni могут быть использованы тугоплавкие металлы, такие как Mo, Ta или Pt [8]. К преимуществам омических

контактов на основе Ti/Al/Ni/Au можно отнести низкое значение приведенного контактного сопротивления ( $< 0.5$  Ом · мм), а к недостаткам — высокую температуру термообработки ( $> 800^\circ\text{C}$ ), а также развитый рельеф поверхности контактной площадки и неровность ее края.

Альтернативой контактам на основе Ti/Al/Ni/Au могут быть низкотемпературные омические контакты на основе TiN/Al, Hf/Al или Ta/Al, которые способны формировать низкорезистивный омический контакт к гетероэпитаксиальным структурам AlGaN/GaN при низких температурах термической обработки ( $< 600^\circ\text{C}$ ), меньшей температуры плавления слоя алюминия, что позволяет обеспечить гладкую морфологию поверхности контактной площадки, а также ее края.

В работе [9] исследованы электрические характеристики омического контакта на основе композиции TiN/Ti/Al/Ti/TiN (10/20/100/20/50 нм) к гетероэпитаксиальным структурам на основе Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N/GaN на кремниевых подложках. Минимальное значение приведенного контактного сопротивления составило 0.67 Ом · мм после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 90$  с. К преимуществам данного контакта можно отнести совместимость с типовыми кремниевыми технологическими процессами, что позволяет производить мощные GaN-приборы на дешевых GaN/Si-пластинах большого диаметра по малозатратной кремниевой технологии.

В работе [10] представлены результаты исследования электрических характеристик омического контакта на основе композиции Hf/Al/Ta (15/200/20 нм) к гетероэпитаксиальным структурам на основе In<sub>0.18</sub>Al<sub>0.82</sub>N/GaN на кремниевых подложках. Минимальное значение приведенного контактного сопротивления составило 0.59 Ом · мм после термической обработки при температуре  $T = 600^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60$  с.

Однако, несмотря на низкие температуры термообработки (550–600°C) и гладкую морфологию поверх-

ности контактной площадки, омические контакты на основе TiN/Al и Hf/Al по величине приведенного контактного сопротивления ( $0.59\text{--}0.67\ \Omega\cdot\text{мм}$ ) уступают высокотемпературным аналогам на основе Ti/Al/Ni/Au ( $< 0.5\ \Omega\cdot\text{мм}$ ). Таким образом, задача по уменьшению контактного сопротивления низкотемпературных омических контактов является актуальной и практически значимой.

Цель настоящей работы заключается в снижении приведенного контактного сопротивления низкотемпературных омических контактов на основе Ta/Al к гетероэпитаксиальным структурам AlGaIn/GaN на кремниевых подложках.

## 2. Методики эксперимента

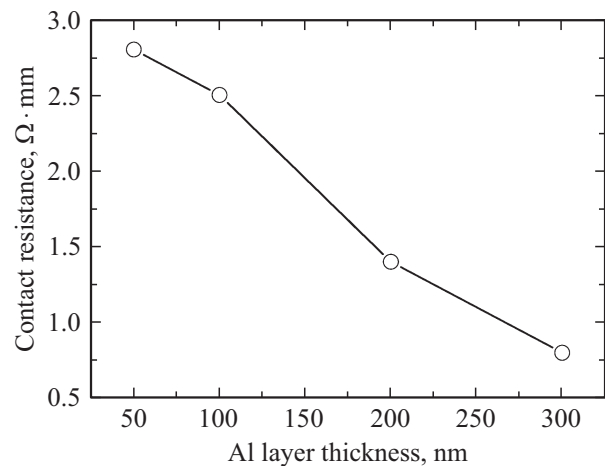
В экспериментах использовались эпитаксиальные гетероструктуры типа *i*-GaN/AlGaIn/GaN, выращенные методом металлоорганической газовой эпитаксии на подложках кремния диаметром 100 мм. Гетероструктура включала в себя буферный слой на основе легированного железом GaN толщиной 2 мкм, каналный слой из нелегированного GaN, барьерный слой  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$  толщиной 12 нм и защитный *i*-GaN слой толщиной 2 нм.

Методом плазмохимического травления на пластинах формировалась межприборная мезаизоляция травлением полупроводника в плазме состава  $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$  на глубину 180 нм. Далее на поверхности пластин литографическими методами формировалась двухслойная фоторезистивная маска, в которой вскрывались окна для формирования металлизации омических контактов. Затем на части пластин производилось плазмохимическое травление рецесса (заглубления) в барьерном слое. Методом электронно-лучевого напыления в вакууме производилось напыление металлизации омического контакта на основе тонких пленок Ta/Al/Ti (Mo, Ni). Толщины слоев Ta и Al варьировались в диапазоне от 5 до 20 нм и от 50 до 300 нм соответственно. При этом толщина верхнего слоя на основе Ti, Mo или Ni была фиксированной и составляла 20 нм. После напыления металлизации омических контактов фоторезистивная маска удалялась и проводился быстрый термический отжиг контактов при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60\ \text{с}$  в атмосфере очищенного азота.

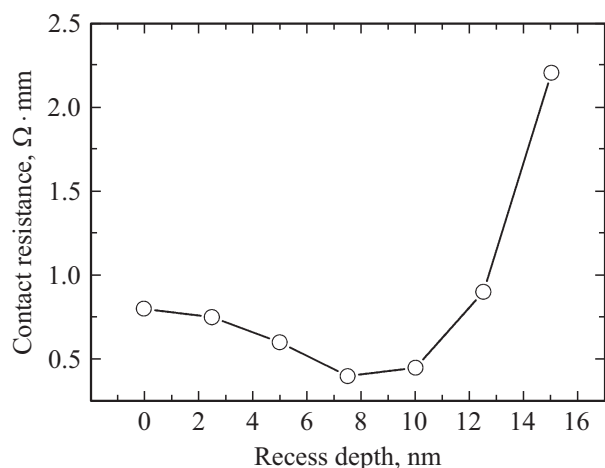
Приведенное контактное сопротивление омического контакта измерялось методом линий передач (МЛП). Морфология поверхности контактных площадок исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость величины приведенного контактного сопротивления омического контакта на основе Ta/Al/Ti (10/X/20 нм)



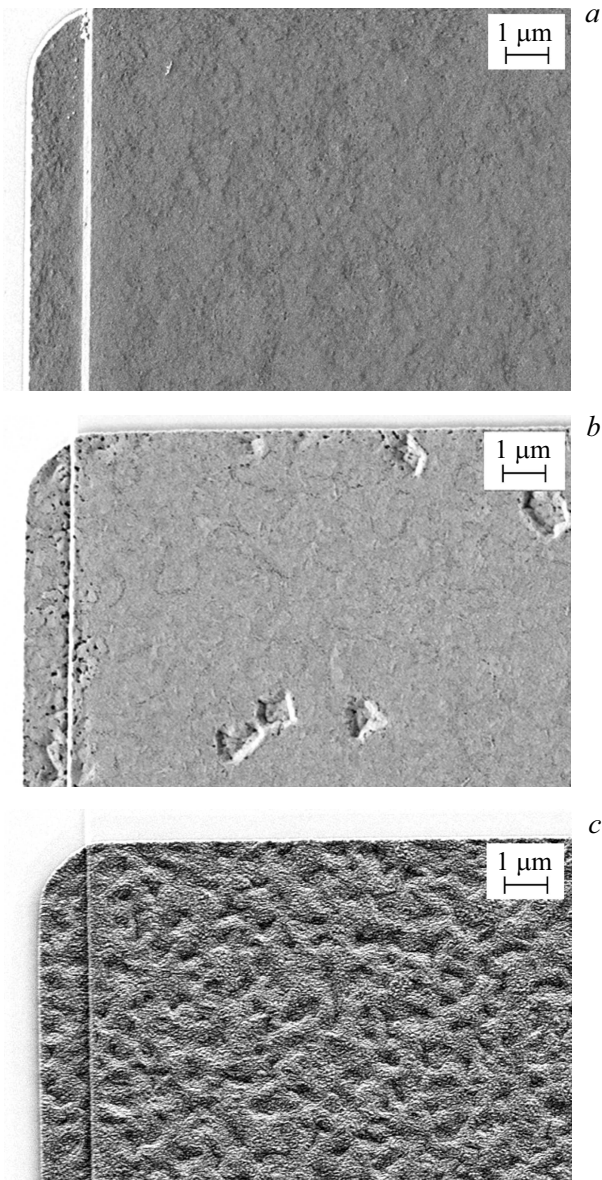
**Рис. 1.** Экспериментальная зависимость величины приведенного контактного сопротивления омического контакта на основе Ta/Al/Ti (10/X/20 нм) от толщины слоя алюминия в диапазоне от  $X = 50$  до 300 нм после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60\ \text{с}$  в среде азота.



**Рис. 2.** Экспериментальная зависимость величины приведенного контактного сопротивления омического контакта на основе Ta/Al/Ti (X/300/20 нм) от толщины слоя тантала в диапазоне от  $X = 5$  до 20 нм после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60\ \text{с}$  в среде азота.

от толщины слоя алюминия в диапазоне от  $X = 50$  до 300 нм после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60\ \text{с}$  в среде азота.

Видно, что при увеличении толщины слоя Al в диапазоне от 50 до 300 нм наблюдается монотонное уменьшение величины приведенного контактного сопротивления с 2.8 до  $0.8\ \Omega\cdot\text{мм}$ . Полученная закономерность может быть объяснена тем, что по мере нарастания толщины пленки Al при фиксированной толщине слоя Ta алюминий связывает все большую часть тантала и уменьшает его количество, которое вступает в реакцию с нижележащими слоями полупроводника, образуя соединение TaN, ответственного за снижение приведенного контактного сопротивления.



**Рис. 3.** Микроскопические изображения поверхности омических контактов на основе Ta/Al/Ti (a), Ta/Al/Mo (b) и Ta/Al/Ni (c) после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60$  с в среде азота.

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость величины приведенного контактного сопротивления омического контакта на основе Ta/Al/Ti ( $X/300/20$  нм) от толщины слоя тантала в диапазоне от  $X = 5$  до 20 нм после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60$  с в среде азота.

Как видно из результатов, представленных на рис. 2, зависимость контактного сопротивления омического контакта на основе Ta/Al/Ti от толщины слоя Ta имеет характерный минимум при толщине 10 нм. Дальнейшее увеличение толщины слоя Ta с 10 до 20 нм приводит к росту контактного сопротивления с 0.8 до 2.4 Ом · мм.

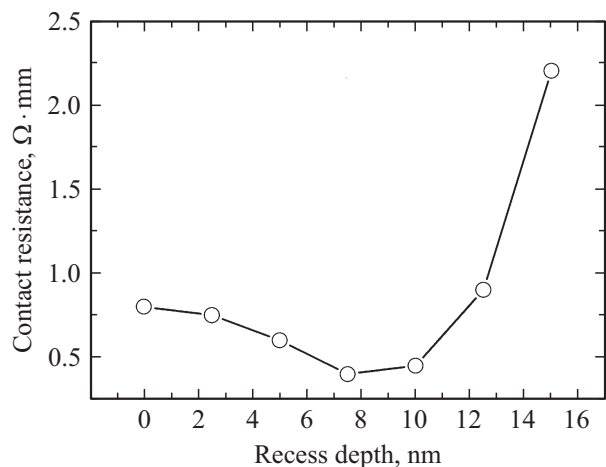
На рис. 3 представлены микроскопические изображения поверхности омических контактов на основе Ta/Al/Ti (a), Ta/Al/Mo (b) и Ta/Al/Ni (c) после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60$  с. Толщины слоев Ta, Al и Ti (Mo, Ni) составляли 10, 300 и 20 нм соответственно.

Из рис. 3, a видно, что омический контакт на основе композиции Ta/Al/Ti после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60$  с в среде азота демонстрирует гладкую морфологию поверхности контактной площадки, а также ровный край. При этом использование пленок Mo (рис. 3, b) и Ni (рис. 3, c) в качестве защитного слоя для пленки алюминия приводит к появлению локальных „кратеров“, а также развитому рельефу поверхности контактной площадки.

Тем не менее, несмотря на гладкую морфологию поверхности омического контакта на основе Ta/Al/Ti (рис. 3, a) достигнутое значение минимального контактного сопротивления после низкотемпературной ( $550^\circ\text{C}$ ) обработки составило 0.8 Ом · мм, что значительно выше значений (0.3–0.5 Ом · мм), достигаемых традиционными высокотемпературными омическими контактами на основе Ti/Al/Ni/Au [3–5]. Таким образом, для дальнейшего уменьшения контактного сопротивления Ta/Al омических контактов было использовано формирование рецесса (углубления) в барьерном слое на основе AlGaN перед напылением металлизации.

На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость величины приведенного контактного сопротивления омического контакта на основе Ta/Al/Ti (10/300/20 нм) от глубины рецесса барьерного слоя AlGaN после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60$  с в среде азота.

Как видно из рис. 4, приведенное контактное сопротивление омического контакта уменьшается по мере приближения границы контакта к области двумерного



**Рис. 4.** Экспериментальная зависимость величины приведенного контактного сопротивления омического контакта на основе Ta/Al/Ti (10/300/20 нм) от глубины рецесса барьерного слоя AlGaN после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60$  с в среде азота.

электронного газа, а затем резко возрастает при пересечении проводящего канала гетероструктуры AlGaN/GaN. Наблюдаемую зависимость можно объяснить следующим образом. При травлении слоя полупроводника уменьшается его количество, которое реагирует с нижележащими слоями металлов, благодаря чему взаимодействие металлов с полупроводником при температурном воздействии происходит более полно и в результате уменьшается сопротивление омического контакта. При залегании нижних слоев металлов ниже области двумерного электронного газа взаимодействия металлов с полупроводником не происходит, что приводит к росту контактного сопротивления.

Таким образом, при использовании травления рецесса на глубину 7.5 нм минимальное значение приведенного контактного сопротивления омического контакта Ta/Al/Ti (10/300/20 нм) составило 0.4 Ом · мм после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60$  с в среде азота. При этом изменений морфологии поверхности контактной площадки при использовании рецесса барьерного слоя выявлено не было, что свидетельствует о перспективности его использования для формирования низкоомных низкотемпературных омических контактов для мощных полупроводниковых приборов на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaN/GaN на кремниевых подложках.

#### 4. Заключение

В работе изучены закономерности формирования низкотемпературного омического контакта на основе Ta/Al к гетероэпитаксиальным структурам AlGaN/GaN на кремниевых подложках. Установлено, что минимальное значение приведенного контактного сопротивления Ta/Al омического контакта достигается при толщинах пленок 10 и 300 нм соответственно. Выявлено влияние материала защитной пленки на основе Ti, Mo, Ni на морфологию поверхности контактной площадки. Показано, что использование рецесса в барьерном слое на основе AlGaN перед напылением металлизации омического контакта позволяет уменьшить значение приведенного контактного сопротивления.

В результате проделанной работы был получен омический контакт на основе Ta/Al/Ti, характеризующийся низким значением приведенного контактного сопротивления (0.4 Ом · мм), а также гладкой морфологией поверхности контактной площадки и ее края после термической обработки при температуре  $T = 550^\circ\text{C}$  в течение  $t = 60$  в среде азота.

Авторы работы выражают благодарность коллективу Научно-производственного комплекса „Микроэлектроника“ АО Научно-производственной фирмы „Микран“ и коллективу Научно-образовательного центра „Нанотехнологии“ Томского государственного университета Систем управления и радиоэлектроники за содействие в проведении экспериментальной части работы и обсуждения результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.577.21.0250 от 26.09.17). Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0250.

#### Список литературы

- [1] M. Rosker, C. Bozada, H. Dietrich. CS MANTECH Conf. Proc. (Tampa, USA, 2009).
- [2] В.Г. Мокеров, А.Л. Кузнецов, Ю.В. Федоров, Е.Н. Енюшкина, А.С. Бугаев, А.Ю. Павлов, Д.Л. Гнатюк, А.В. Зуев, Р.Р. Галиев, Е.Н. Овчаренко, Ю.Н. Свешников, А.Ф. Цапульников, В.М. Устинов. ФТП, **43** (4), 561 (2009).
- [3] H.P. Xin, S. Poust, W. Sutton. CS MANTECH Conf. Proc. (Portland, Oregon, USA, 2010).
- [4] V. Tilak, R. Dimitrov, M. Murphy, B. Green, J. Smart, W.J. Schaff, J.R. Shealy, L.F. Eastman. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **622**, T7.4.1 (2000).
- [5] F.A. Faria, J. Guo, P. Zhao, G. Li, P.K. Kandaswamy, M. Wistey, H.G. Xing, D. Jena. Appl. Phys. Lett., **101**, 109 (2012).
- [6] B. Van Daele, G. Van Tendeloo, W. Ruythooren. Appl. Phys. Lett., **87**, 061905 (2005).
- [7] M.W. Fay, G. Moldovan, P.D. Brown. J. Appl. Phys., **92**, 94 (2002).
- [8] F.M. Mohammed, L.K. Wang, S. Liang, H.H. Deepak, I. Adesida. J. Vac. Sci. Technol. B, **26** (3), 2330 (2005).
- [9] A. Firrencieli, B. Jaeger, S. Decoutere. Jpn. J. Appl. Phys., **53**, 03EF01-1 (2014).

Редактор А.Н. Смирнов

#### Low temperature Ta/Al based ohmic contacts to AlGaN/GaN heteroepitaxial structures on silicon wafers

E.V. Erofeev<sup>1</sup>, I.V. Fedin<sup>1</sup>, V.V. Fedina<sup>1</sup>, A.P. Fazleev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Electrical Communication Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050 Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Research Research & Production Company Micran, 634041 Tomsk, Russia

**Abstract** The mechanisms of formation of low temperature Ta/Al based ohmic contacts to Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N/GaN heterostructures on silicon wafers were investigated. Fabricated ohmic contacts based on Ta/Al/Ti (10/300/20 nm) have the low contact resistance (0.4 Ω · mm) and smooth surface morphology and well defined contact edge after thermal annealing at  $T = 550^\circ\text{C}$  during  $t = 60$  s in nitrogen environment.