

Формирование омических контактов Ta/Ti/Al/Mo/Au к гетероструктуре AlGaN/AlN/GaN, выращенной на кремниевой подложке

© К.Ю. Осипов[†], Л.Э. Великовский*, В.А. Кагадей*

Научно-исследовательский институт систем электрической связи
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники,
634034 Томск, Россия

* ЗАО «Научно-производственная фирма „Микран“»,
634045 Томск, Россия

(Получена 21 марта 2013 г. Принята к печати 1 апреля 2013 г.)

Исследованы закономерности формирования омических контактов Ta/Ti/Al/Mo/Au к гетероструктуре Al_{0.26}Ga_{0.74}N/AlN/GaN, выращенной на подложке из полупроводникового Si (111). Установлены зависимости контактного сопротивления от толщины слоев Al (90, 120, 150, 180 нм) и Ti (15, 30 нм), а также оптимальные температурно-временные режимы отжига для каждого из изученных вариантов металлизации. Показано, что при увеличении толщины слоя Al от 90 до 180 нм и неизменных толщинах слоев Ta, Ti, Mo, Au минимально достижимое контактное сопротивление монотонно увеличивалось от 0.43 до 0.58 Ом·мм. Изменение толщины слоя Ti от 15 до 30 нм не оказало существенного влияния на минимальную величину приведенного контактного сопротивления. Наименьшее контактное сопротивление, равное 0.4 Ом·мм, было достигнуто при использовании слоев Ta/Ti/Al/Mo/Au с толщинами 10/15/90/40/25 нм соответственно. Оптимальная температура отжига для данного варианта металлизации составила 825°C при длительности процесса 30 с. Полученные омические контакты имели ровный край контактных площадок и гладкую морфологию их поверхности.

1. Введение

Получение низкоомных омических контактов к гетероструктурам AlGaN/AlN/GaN в силу особенностей, характерных для твердого раствора AlGaN (большая ширина запрещенной зоны и склонность к образованию на поверхности пленки Al₂O₃), а также для гетероструктуры (отсутствие легирования в барьерном слое и отсутствие n⁺-слоя), является серьезной проблемой. Базовыми металлами для формирования омических контактов к GaN и его твердым растворам являются Ti и Al [1,2]. Для предотвращения окисления Al и обеспечения малого переходного сопротивления при формировании металлизации разводки первого уровня площадки с омическими контактами покрывают пленкой Au, а для предотвращения перемешивания Al с Au и образования высокоомного соединения Al–Au между этими слоями вводят пленку Ni.

Омический контакт на основе металлизации Ti/Al/Ni/Au сегодня наиболее распространен и изучен [3–5]. В работе [4] рассмотрено влияние соотношения толщин слоев Ti/Al в контакте на основе Ti/Al/Ni/Au на величину контактного сопротивления и морфологию поверхности омических контактов. Было показано, что при соотношении Ti/Al, равном 0.3, достигаются наилучшие морфологические характеристики поверхности, а при соотношении 0.6 — наименьшее контактное сопротивление. В работе [3] выполнено исследование, направленное на поиск оптимального соотношения толщин слоев Ni/Au для омических контактов Ti/Al/Ni/Au. Показано, что минимальное контактное сопротивление 0.26 Ом·мм и гладкая

поверхность омических контактов (среднеквадратичная шероховатость 20 нм) получаются при соотношении Ni/Au, равном 2:1. При уменьшении толщины слоя Ni резко увеличивается контактное сопротивление, но поверхность остается гладкой. При увеличении толщины слоя Au рельеф поверхности омических контактов сильно увеличивается, но контактное сопротивление практически не возрастает. В работах [1,6] были оптимизированы тип материала и толщина барьерного слоя, вводимого между пленками Au и Al. В работе [1] показано, что при замене слоя Ni на слой Mo удается добиться более низкого контактного сопротивления и почти в 3 раза меньшей среднеквадратичной шероховатости поверхности омического контакта (28.9 и 82.2 нм для Mo и Ni соответственно). Кроме того, при использовании слоя Mo минимальное значение контактного сопротивления достигалось при отжиге в более широком температурном диапазоне. Таким образом, применение в составе металлизации омических контактов барьерного слоя из Mo является перспективной альтернативой стандартному контакту с барьерным слоем на основе Ni [7].

Дальнейшие попытки уменьшения контактного сопротивления были связаны с введением дополнительного слоя Ta, наносимого непосредственно на поверхность полупроводника [8]. Так как Ta имеет меньшую работу выхода (4.25 эВ), чем Ti (4.33 эВ), он должен обеспечить меньшее сопротивление омического контакта. Однако по сравнению с омическими контактами Ti/Al/Ni/Au закономерности формирования контактов на основе металлизации Ta/Ti/Al/Mo/Au являются существенно менее изученными и для полного их понимания требуется проведение дополнительных комплексных исследований.

Целью данной работы является исследование закономерностей формирования омических контактов

[†] E-mail: docar@mail.ru

Ta/Ti/Al/Mo/Au к гетероструктуре AlGaN/AlN/GaN при варьировании толщин слоев Ti и Al, а также определение оптимальных вариантов металлизации и температурно-временных режимов отжига омических контактов.

2. Методика эксперимента

Гетероструктуры $Al_{0.26}Ga_{0.74}N/AlN/GaN/Si$ были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на полуизолирующих кремниевых подложках с кристаллографической ориентацией (111). Перед процессом формирования омических контактов с помощью реактивно-ионного травления в плазме BCl_3 формировалась межприборная изоляция. После формирования фоторезистивной маски с топологией контактных площадок, обеспечивающей измерение приведенного контактного сопротивления методом длинной линии (МДЛ), с помощью электронно-лучевого испарения осаждались металлические слои омического контакта. Скорость осаждения металлических пленок измерялась с помощью кварцевого датчика с точностью 0.1 нм/с. Толщины слоев Ta, Mo и Au были постоянны и составляли 10, 40 и 25 нм соответственно. В экспериментах, посвященных исследованию влияния толщины слоя Al на характеристики контактов, толщина слоя Al изменялась от 90 до 180 нм с шагом 30 нм, при этом толщина слоя Ti поддерживалась постоянной и составляла 30 нм. В экспериментах, направленных на изучение влияния толщины слоя Ti на параметры контактов, толщина слоя Ti составляла 15 и 30 нм, а толщина слоя Al была фиксированной и составляла 90 нм. Толщины слоев металлизации омического контакта контролировались при помощи механического профилометра с точностью ± 1 нм.

Перед отжигом пластины $Al_{0.26}Ga_{0.74}N/AlN/GaN/Si$ разделялись на образцы площадью примерно 0.25 см^2 . Отжиг образцов проводился при пониженном давлении в атмосфере азота на установке быстрого термического отжига. Во время отжига для получения большей равномерности нагрева образцы располагались на графитовом держателе. Время отжига изменялось от 30 до 120 с, температура отжига варьировалась в диапазоне от 800 до 1000°C . Точность воспроизведения температуры составляла $\pm 5^\circ\text{C}$. Измерение температуры проводилось с помощью термопары, закрепленной в графитовом держателе, на котором располагались образцы. Измерения контактного сопротивления омических контактов производились четырехзондовым МДЛ с погрешностью измерения 10%.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты экспериментов, направленных на определение оптимальной температуры отжига, необходимой для получения минимального сопротивления контактов Ta/Ti/Al/Mo/Au с толщиной

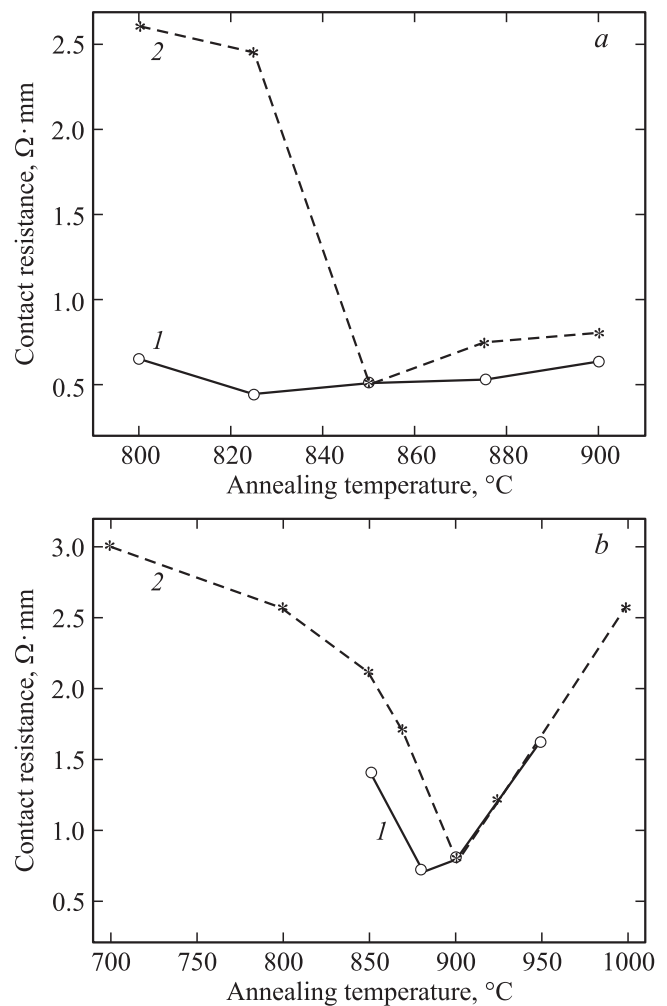


Рис. 1. Зависимости минимального контактного сопротивления омического контакта Ta/Ti/Al/Mo/Au от температуры отжига. Толщина пленки Al: а — 90 (1) и 120 нм (2); б — 150 (1) и 180 нм (2). Длительность отжига 30 с.

пленки Al, меняющейся от 90 до 180 нм, при фиксированной длительности отжига 30 с. Зависимости контактного сопротивления от температуры имеют характерную форму кривых с минимумом. Для толщины пленки Al, равной 90 нм (рис. 1, а), минимальное контактное сопротивление составило 0.43 $\Omega \cdot \text{mm}$ и было получено при температуре отжига 825°C . Для толщины пленки Al 120 нм (рис. 1, а) эти величины были равны 0.49 $\Omega \cdot \text{mm}$ и 850°C соответственно. Для толщин слоя Al 150 и 180 нм (рис. 1, б) минимальные контактные сопротивления составили 0.7 и 0.8 $\Omega \cdot \text{mm}$ при температурах отжига 875 и 900°C соответственно.

На рис. 2 приведена зависимость минимального контактного сопротивления омических контактов от толщины слоя Al, построенная на основе данных рис. 1. Видно, что при увеличении толщины слоя Al происходит монотонный рост минимального контактного сопротивления. Полученная закономерность может быть объяснена тем, что по мере нарастания толщины плен-

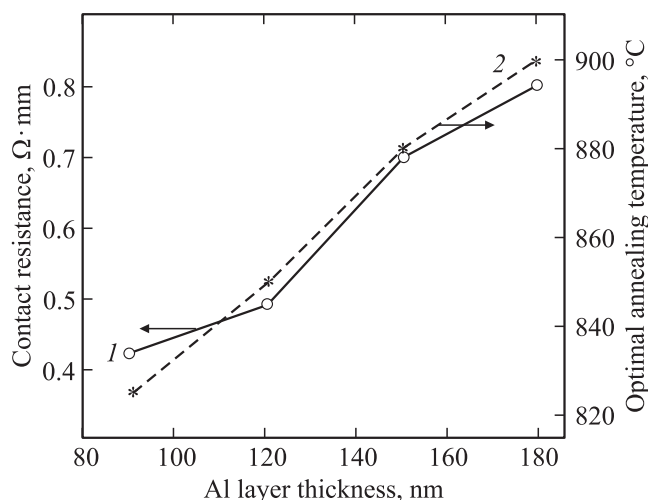


Рис. 2. Зависимости минимального контактного сопротивления (1) и оптимальной температуры отжига (2) омических контактов Ta/Ti/Al/Mo/Au от толщины слоя Al. Длительность отжига 30 с.

ки Al при фиксированной толщине слоя Ti алюминий связывает все большую часть титана и уменьшает его количество, которое вступает в реакцию со слоями полупроводника, образуя соединение TiN, и формирует омический контакт. Этот вывод хорошо согласуется с данными работы [9], где механизм связывания Ti с Al в процессе отжига рассмотрен более подробно.

Зависимость оптимальной температуры отжига от толщины пленки Al, приведенная на рис. 2, указывает на то, что с увеличением толщины Al оптимальная температура отжига омического контакта повышается. Данная закономерность, по-видимому, связана с тем, что при увеличении толщины пленки Al все большая часть слоя Ti связывается с алюминием и для компенсации этого и стимуляции процесса образования соединения TiN, ответственного за снижение контактного сопротивления, необходимо увеличивать температуру отжига. Согласно данным работы [10], термически активированный процесс образования TiN на границе между омическим контактом и слоем AlGaIn может быть описан следующим выражением:

$$x = \sqrt{kt}, \quad (1)$$

где x — толщина слоя TiN, k — константа реакции, t — время. Константа k находится из выражения

$$k = k_0 e^{-E/k_B T}, \quad (2)$$

где k_0 — константа реакции, зависящая от толщины пленки Al, T — температура отжига, E — энергия активации процесса образования TiN, k_B — постоянная Больцмана. Если исходить из предположения, что для формирования омического контакта с минимальным сопротивлением необходимо образование слоя TiN оптимальной толщиной x_{opt} , то при одинаковом времени отжига и различной оптимальной температуре отжига

получение оптимальной толщины x_{opt} возможно только при различных значениях константы реакции k_0 , зависящей от толщины слоя Al. С целью проверить эту гипотезу и показать, что в определенных температурно-временных диапазонах она работает, были проделаны две серии дополнительных экспериментов.

В первой серии омический контакт Ta/Ti/Al/Mo/Au со слоем Al толщиной 90 нм отжигался при постоянной температуре 800°C и временах отжига, равных 30, 60, 90 и 120 с. Как видно из данных, представленных на рис. 3, зависимость контактного сопротивления от времени отжига имеет вид практически монотонно падающей кривой, со слабо выраженным минимумом. По-видимому, при малых временах отжига толщина образовавшегося слоя TiN недостаточна для формирования низкоомного омического контакта. В связи с этим рост времени отжига приводит к увеличению толщины слоя TiN и монотонному падению сопротивления омического контакта. При времени отжига, большем оптимального значения, согласно данным [11], вследствие чрезмерного проникновения TiN в слой AlGaIn может происходить деградация слоя двумерного электронного газа в гетероструктуре и, как следствие, рост контактного сопротивления.

Во второй серии экспериментов для получения контактного сопротивления, близкого к минимальному, образцы отжигались при фиксированных температурах 800, 830 и 850°C с варьированием времени отжига. Было выяснено, что при различных температурах отжига, лежащих в диапазоне от 800 до 850°C, всегда удавалось подобрать время отжига, которое бы обеспечивало получение контактного сопротивления, близкого к минимальному значению, достигнутому во всех сериях экспериментов и составляющему ~ 0.45 Ом·мм.

Суммируя результаты описанных выше двух серий экспериментов, можно утверждать, что увеличение толщины пленки Al от 90 до 180 нм приводит к снижению

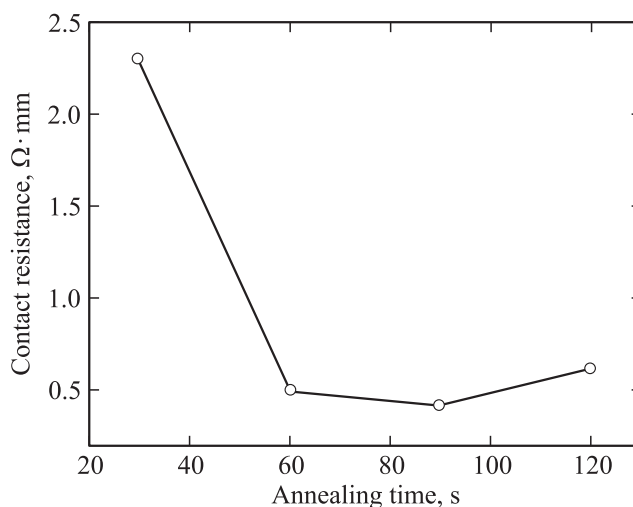


Рис. 3. Зависимость контактного сопротивления омического контакта Ta/Ti/Al/Mo/Au от времени отжига при фиксированной температуре отжига 800°C.

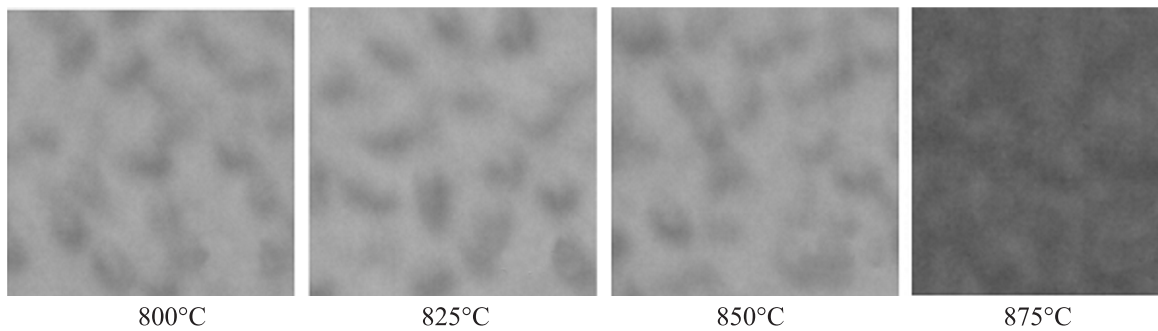


Рис. 4. Микроскопические изображения поверхности омических контактов Ta/Ti/Al/Mo/Au, отожженных при температурах 800, 825, 850 и 875 °С в течение 30 с.

величины константы реакции образования TiN за счет уменьшения величины k_0 . Для достижения оптимальной толщины образующегося во время отжига слоя TiN с ростом толщины пленки Al необходимо либо повышать температуру отжига, либо увеличивать длительность отжига.

Следует отметить, что закономерности и механизмы, описанные выше, не распространяются на температуры отжига, которые лежат гораздо выше диапазона оптимальных температур. Так, на рис. 4 приведены микроскопические изображения поверхности омических контактов, отожженных в течение 30 с при температурах 800, 825, 850 и 875 °С. Видно, что изображения поверхности первых трех образцов практически идентичны, в то время как контраст серого для поверхности омического контакта, отожженного при температуре 875 °С, отличается от характерного для остальных. Это может свидетельствовать об изменении механизма формирования омического контакта и образовании в нем соединений, отличных от тех, что образуются при более низких температурах отжига (800–850 °С).

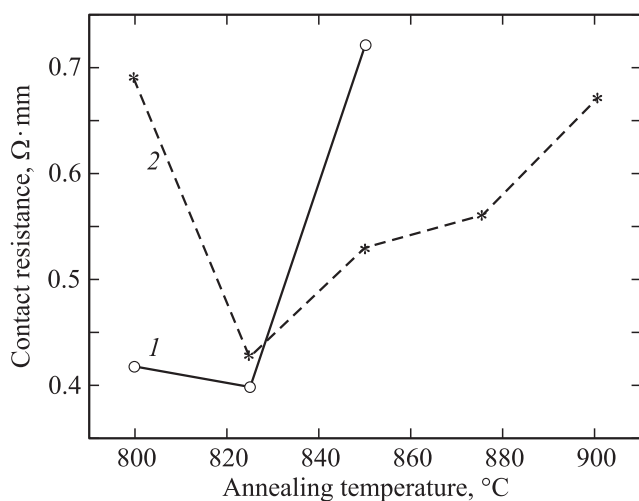


Рис. 5. Зависимости минимального контактного сопротивления от температуры отжига для омических контактов Ta/Ti/Al/Mo/Au с толщиной слоя Ti 15 (1) и 30 нм (2). Длительность отжига 30 с.

Согласно данным рис. 2, экспериментально полученное минимальное значение контактного сопротивления достигается при толщине пленки Al 90 нм. В работе [9] показано, что дальнейшее уменьшение толщины слоя Al может привести к недостаточному связыванию титана, что в свою очередь приведет к процессу интенсивной экстракции атомов азота из слоя GaN, атомов галлия из слоя AlGaN и, как следствие, к росту контактного сопротивления.

На рис. 5 приведены зависимости минимального контактного сопротивления от температуры отжига для двух различных толщин слоя Ti. В обоих случаях зависимости имеют одинаковый вид — с ростом температуры отжига контактное сопротивление сначала падает, затем достигает своего минимума при $T = 825^\circ\text{C}$ и с дальнейшим повышением температуры начинает увеличиваться. При этом наклон левых и правых ветвей кривых различен. Поведение кривых может быть объяснено в рамках описанных выше, а также в работе [9], механизмов влияния формирования слоя TiN на контактное сопротивление. Минимальное контактное сопротивление для омических контактов с пленкой Ti толщиной 15 и 30 нм составило 0.4 и 0.43 Ом·мм соответственно. Для обеих толщин пленок Ti оптимальная температура отжига составила 825 °С.

Полученные в данной работе значения контактных сопротивлений и режимов отжига хорошо коррелируют с данными работ [7,12]. Разработанный технологический процесс формирования омических контактов был внедрен в маршрут изготовления GaN-транзисторов с высокой подвижностью электронов.

4. Заключение

В работе изучены закономерности отжига омических контактов Ta/Ti/Al/Mo/Au к гетероструктурам Al_{0.26}Ga_{0.74}N/AlN/GaN. Установлено, что минимальное контактное сопротивление омических контактов Ta/Ti/Al/Mo/Au, получаемое в оптимальном температурно-временном режиме отжига, с увеличением толщины слоя Al от 90 до 180 нм монотонно

но растет. Исследование влияния толщины слоя Ti на величину контактного сопротивления показало, что ее двукратное уменьшение практически не оказывает влияния ни на минимальное контактное сопротивление, ни на оптимальный режим отжига. Отжиг образцов $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}/\text{Al}/\text{GaN}$ с нанесенными омическими контактами Ta/Ti/Al/Mo/Au с толщинами слоев 10/15/90/40/25 нм при температуре 825°C в течение 30 с позволяет получить минимальное контактное сопротивление 0.4 Ом · мм.

Авторы работы выражают благодарность коллективу НПК „Микроэлектроника“ ЗАО «„НПФ „Микран“» за содействие в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07 сентября 2010 г. в порядке реализации постановления № 218 Правительства РФ.

Список литературы

- [1] F.M. Mohammed, L.K. Wang, J. Hyung, I. Adesida. *J. Appl. Phys.*, **101**, 033 708 (2007).
- [2] F. Cayrel, O. Ménard, A. Yvon, N. Thierry-Jébali, C. Brylinsky, E. Collard, D. Alquier. *Phys. Status Solidi A*, **209** (6), 1059 (2012).
- [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.* (San Francisco, CA, USA, 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**, 032 109 (2012).
- [6] C.K. Wang, Nam-Young. *Nanoscale Res. Lett.*, **7**, 107 (2012).
- [7] F.M. Mohammed, L.K. Wang, S. Liang, H.H. Deepak, I. Adesida. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **26** (3), 2330 (2005).
- [8] K.H. Kim, C.M. Jeon, S.H. Oh, J.L. Lee, C.G. Park. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **23** (1), 322 (2005).
- [9] B.V. Daele, G.V. Tendeloo, W. Ruythooren, J. Derluyn, M.R. Leys, M. Germain. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 061 905 (2005).
- [10] L.K. Wang, F.M. Mohammed, I. Adesida. *J. Appl. Phys.*, **101**, 013 702 (2007).
- [11] L.K. Wang, F.M. Mohammed, I. Adesida. *J. Appl. Phys.*, **103**, 093 516 (2008).
- [12] Y. Sun, L.F. Eastman. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **24** (6), 2723 (2006).

Редактор Л.В. Шаронова

Formation of Ta/Ti/Al/Mo/Au ohmic contacts to a AlGaIn/GaN heterostructure grown on silicon substrate

K.Y. Osipov, L.E. Velikovskiy*, V.A. Kagadei*

Research Institute of Telecommunications Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
634034 Tomsk, Russia
* Research & Production Company „Micran“,
634045 Tomsk, Russia

Abstract In present work main mechanisms of formation of Ta/Ti/Al/Mo/Au ohmic contacts were investigated. Dependencies of contact resistance on Al and Ti layer thicknesses were found, also optimal annealing regimes for every metallization scheme were obtained. It has been shown that increasing of Al layer thickness from 90 to 180 nm with fixed thicknesses of the other metal layers leads to rising of minimal contact resistance from 0.43 to 0.58 Ω · mm. Minimal contact resistance 0.4 Ω · mm was achieved using Ta/Ti/Al/Mo/Au metallization scheme with thicknesses of metal layers 10/15/90/40/25 nm, respectively, and annealing process of the temperature 825°C for 30 s. Obtained ohmic contacts had well defined edge and smooth surface.