

УДК 621.382.323

Л.Э. Великовский, П.Е. Сим

Оптимизация омических контактов к AlGaN/GaN-транзисторам с высокой подвижностью электронов

Рассматриваются проблемы оптимизации состава омических контактов к транзисторам с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, сформированной на подложках из кремния, сапфира и карбида кремния. В результате проведения исследований были найдены зависимости контактного сопротивления от соотношения толщин слоев металлизации на основе Ti/Al/Mo/Au. Оптимизированный состав контактной металлизации обеспечивает низкое контактное сопротивление ($0,3\text{--}0,5 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$) при гладкой морфологии поверхности омических контактов.

Ключевые слова: транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT), быстрый термический отжиг, омические контакты, метод длинных линий, нитрид галлия.

Сопротивление омических контактов оказывает сильное влияние на важнейшие параметры СВЧ-транзисторов на основе GaN. Для производства таких транзисторов необходимо минимизировать разброс сопротивления омических контактов по пластине и от пластины к пластине, а также обеспечить приемлемые для используемой технологии производства рельеф поверхности и неровность границ контактов.

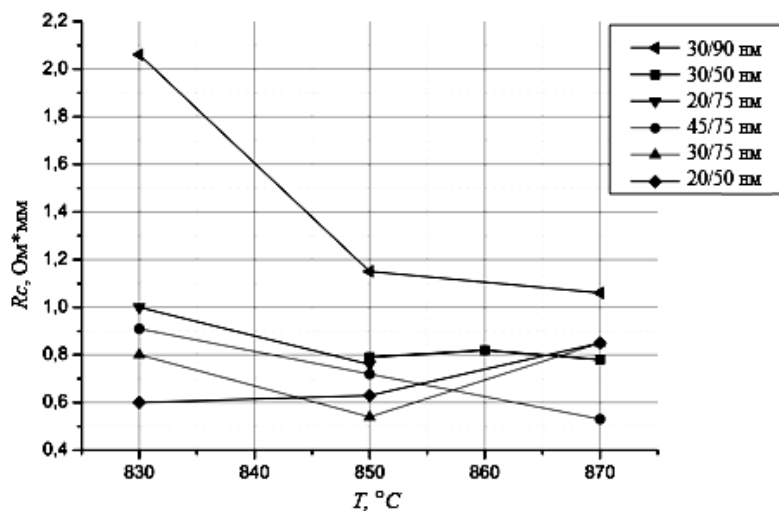
В литературе проблемы качества омических контактов связывают с образованием в ходе отжига высокоомных соединений Al_2O_3 , Au_5Al_2 и AuAl_2 [1–3], а также с неоптимальным составом слоев металлизации контакта [2, 4]. Поэтому для решения задачи по оптимизации технологии и структуры формирования контактов необходим учет всех факторов, влияющих на формирование контакта, и глубокое понимание химических реакций, происходящих в процессе отжига металлизации контакта.

Самым распространенным типом металлизации омических контактов является система Ti/Al/Барьерный слой/Au. Механизм формирования омического контакта к AlGaN/GaN до конца не изучен, но известно, что для образования низкоомного контакта к GaN необходимо образование TiN на границе и в глубине нитрида галлия. Для получения одновременно низкого контактного сопротивления и минимального рельефа поверхности в качестве барьерного слоя было предложено использовать молибден [4–7]. Поскольку для используемой при производстве транзисторов технологии минимизация рельефа поверхности является одним из важных критериев оценки качества контактов, для исследования была выбрана структура металлизации, содержащая молибден в качестве барьерного слоя (Ti/Al/Mo/Au).

Экспериментальная часть. Слои Ti/Al/Mo/Au на исследуемых образцах были сформированы методом электронно-лучевого напыления. Для формирования контактов полученные образцы помещались в установку быстрого термического отжига и отжигались в диапазоне температур $780\text{--}900 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 с в атмосфере азота при давлении $40\text{--}375 \text{ мм рт. ст.}$ Измерение контактного и слоевого сопротивления производилось методом длинных линий (TLM).

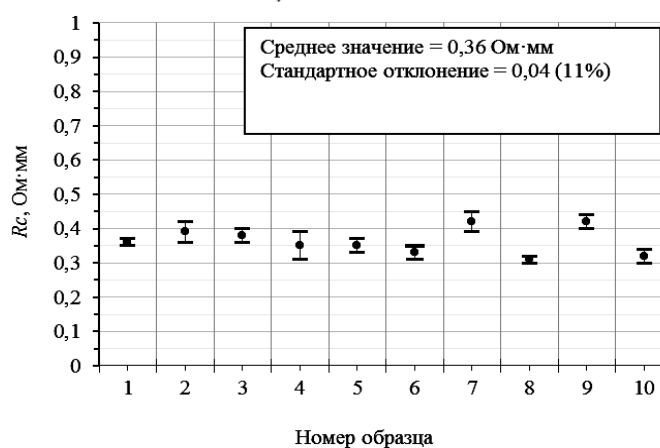
В результате проведенных исследований были получены данные по более чем 200 экспериментальным образцам. Они включали величины контактных сопротивлений, внешнего вида, рельефа и слоевого сопротивления образцов для различных материалов подложки (кремний, сапфир и карбид кремния) и режимов быстрого термического отжига. На рис. 1 представлена часть полученных экспериментальных данных. Наименьшим значением контактного сопротивления обладали структуры со следующими толщинами титана и алюминия: 20/50, 30/75, 45/75 нм, но с учетом того, что температура процесса быстрого термического отжига оказывает прямое влияние на морфологию поверхности омических контактов, с технологической точки зрения наибольший интерес представляет структура с толщинами Ti/Al/ 20/50 нм, так как имеет низкое значение контактного сопротивления при наименьшей температуре. По характеру кривой для данной структуры можно предположить, что минимум контактного сопротивления должен соответствовать температурам быстрого термического отжига ниже $830 \text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, оптимальная температура, позволяющая достичь значений контактного сопротивления в диапазоне $0,3\text{--}0,5 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$ для данной структуры составила $800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рис. 1. Зависимость контактного сопротивления от температуры быстрого термического отжига для образцов с различным соотношением толщин Ti/Al



После того как были найдены оптимальные соотношения толщин Al/Ti (20/50 нм), была проведена серия напылений и проанализированы полученные данные (рис. 2).

Рис. 2. Разброс значения контактного сопротивления для серии образцов GaN на SiC



Таким образом, на данных образцах, помимо низкого значения контактного сопротивления, удалось добиться воспроизводимости результатов, являющейся критичной для производства.

На рис. 3 показан внешний вид образцов после отжига омических контактов, из которого видно, что поверхность оптимизированной структуры контакта имеет более мелкий рельеф при ровной границе края контакта по сравнению со структурой Ti/Al/Ni/Au.

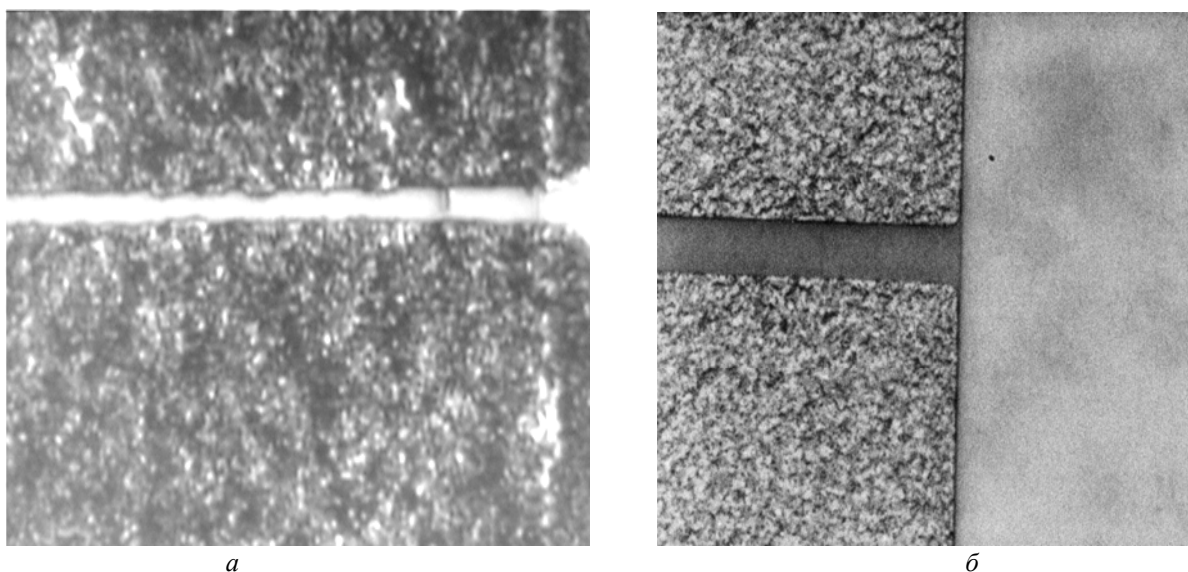
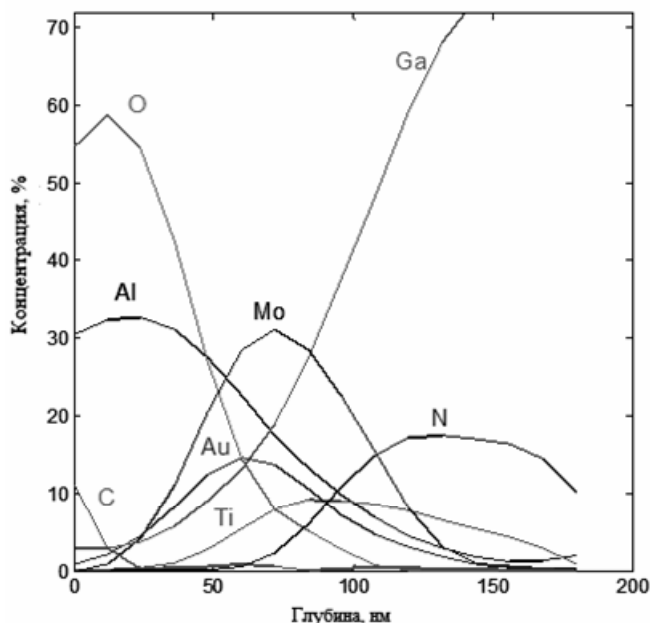


Рис. 3. Внешний вид омических контактов к AlGaN/GaN HEMT при увеличении 1500×: а – Ti/Al/Ni/Au; б – Ti/Al/Mo/Au

Для определения профиля элементного и химического состава металлизации контакта, образцы были исследованы методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Из представленного на рис. 4 элементного профиля по глубине видно, что при отжиге Ti/Al/Mo/Au, происходит сильное перемешивание слоев металлизации контакта, в результате которого на поверхности оказывается оксид алюминия. В качестве барьерного слоя молибден, очевидно, не препятствует диффузии алюминия к поверхности контакта, однако его отсутствие отрицательно сказывается на рельефе и на контактном сопротивлении. Несмотря на перемешивание слоев металлов, в контакте не обнаружено



присутствия соединений золота с алюминием Au_5Al_2 и $AuAl_2$. Это является значительным отличием Ti/Al/Mo/Au состава металлизации от часто используемого Ti/Al/Ni/Au. Азот при отжиге диффундирует из GaN вверх, формируя TiN, что согласуется с литературными данными [1, 6–8]. Известно, что вакансии азота выступают в качестве донорных примесных центров в GaN, уменьшая ширину барьера и позволяя получить на образцах низкое значение контактного сопротивления.

Рис. 4. Элементный профиль по глубине для Ti/Al/Mo/Au омических контактов после отжига

Несмотря на то, что в сериях экспериментов на образцы с AlGaN/GaN гетероструктурами, выращенными на подложках сапфира, карбида кремния и кремния, омические контакты наносились в одном процессе, при проведении совместной операции быстрого термического отжига образцов этих трех видов низкого контактного сопротивления удалось добиться только на образцах, выращенных на подложках кремния и сапфира. Более высокое сопротивление образцов на 4H-SiC (0,5–0,6 Ом·мм) может быть связано с динамикой нагрева подложки в процессе отжига, не позволяющей быстро нагревать образцы. Решение этой проблемы было найдено в достижении однородности нагрева и увеличении мощности подаваемой на галогенные лампы установки быстрого термического отжига.

Литература

1. Correlation of contact resistance with microstructure for Au/Ni/Al/Ti/AlGaN/GaN ohmic contacts using transmission electron microscopy / A.N. Bright, P.J. Thomas, M. Weyland et al. // Journal of Applied Physics (New York). – 2001. – Vol. 89, №6. – P. 3143–3151.
2. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au, and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures / D. Selvanathan, F. M. Mohammed, A. Tesfayesus, I. Adesida // Journal of Vacuum Science & Technology B (New York). – 2004. – Vol. 22, № 5. – P. 2409–2417.
3. Транзистор на GaN пока самый «крепкий орешек» / В. Данилин, Т. Жукова, Ю. Кузнецов и др. // НТБ Электроника (Смоленск). – 2005. – № 4. – С. 20–29.
4. Optimization of AlGaN/GaN HEMT Ohmic Contacts for Improved Surface Morphology with Low Contact Resistance / H.P. Xin, S. Poust, W. Sutton et al. // CS Mantech conference (Beaverton). – 2010. № 9. – P. 149–152.
5. Reliable Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts to n-type GaN formed by vacuum annealing / N.A. Papanicolaou, M.V. Rao, J. Mittereder, W.T. Anderson // Journal of Vacuum Science & Technology B (New York). – 2001. – Vol. 19, № 1. – P. 261–268.
6. Investigation of Ta/Ti/Al/Ni/Au ohmic contact to AlGaN/GaN heterostructure field-effect transistor / K.H. Kim, C.M. Jeon, S.H. Oh et al. // Journal of Vacuum Science & Technology B (New York). – 2005. – Vol. 23, № 1. – P. 322–327.

7. Ohmic contact formation mechanism of Ta/Al/Mo/Au and Ti/Al/Mo/Au metallizations on Al-GaN/GaN HEMTs / F.M. Mohammed, L. Wang, D. Selvanathan et al. // Journal of Vacuum Science & Technology B (New York). – 2005. – Vol. 23, № 6. – P. 2330–2336.

8. The role of Al on Ohmic contact formation on n-type GaN and AlGaN/GaN / B. Van Daele, G. Van Tendeloo, W. Ruythooren et al. // Applied physics letters (New York). – 2005. – Vol. 87, № 6. – P. 061905.

Великовский Леонид Эдуардович

Главный технолог НПК «Микроэлектроника», НПФ «Микран», Томск

Тел.: 8-913-880-13-41

Эл. почта: level@micran.ru

Сим Павел Евгеньевич

Магистрант каф. физической электроники ТУСУРа

Тел.: 8-923-417-11-10

Эл. почта: nezt@ya.ru

Velikovsky L.E., Sim P.E.

Optimization of ohmic contacts for AlGaN/GaN high electron mobility transistors

A new manufacturing process was developed for optimization of ohmic contacts for AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors on silicon carbide, silicon and sapphire substrates. It has been demonstrated that by using Ti/Al/Mo/Au metallization, ohmic contacts with both smooth surface morphology and a low contact resistance (0.3–0.5 Ohm*mm) can be obtained.

Keywords: high electron mobility transistor (HEMT), rapid thermal annealing (RTA), ohmic contacts, transmission line method (TLM), gallium nitride (GaN).