

УДК 621.382.323

В.В. Скубо, П.Е. Сим, Л.Э. Великовский, Ю.Н. Поливанова, А.Ф. Цацульников

Исследование свойств несплавных омических контактов к гетероструктуре AlGaN/GaN

Получение омических контактов с низким сопротивлением на транзисторной гетероструктуре AlGaN/GaN позволяет улучшить характеристики изготавливаемых на ее основе СВЧ-транзисторов. В работе представлены результаты эксперимента по формированию низкоомного омического контакта к гетероструктуре n^+ Al_{0,05}Ga_{0,95}N/i-Al_{0,23}Ga_{0,77}N/GaN с выращенным селективной эпитаксией слоем n^+ . Получены значения контактного сопротивления для различных температур отжига контакта и без проведения процесса отжига.

Ключевые слова: несплавные омические контакты, контактное сопротивление, гетероструктура AlGaN/GaN, селективная эпитаксия GaN.

За последние годы ведущими производителями полупроводниковых СВЧ-приборов были проведены успешные разработки транзисторов на основе нитрида галлия, позволившие начать промышленный выпуск мощных полевых гетероструктурных AlGaN/GaN СВЧ-транзисторов. Сопротивление омического контакта для выпускаемых промышленно нитрид-галлиевых СВЧ-транзисторов составляет 0,4÷0,6 Ом·мм, что существенно ограничивает СВЧ-параметры транзисторов, прежде всего возможности расширения частотного диапазона применения данных устройств. Для формирования омического контакта, как правило, используется процесс быстрого высокотемпературного (до 900 °С) отжига. Сформированные таким методом контакты имеют грубый рельеф и неровный край контакта [1].

Одним из методов снижения сопротивления контакта и улучшения его морфологии является формирование контакта к сильнолегированному слою полупроводника. Из-за особенностей технологии изготовления транзисторов на AlGaN/GaN гетероструктуре такой слой формируют не на всей гетероструктуре, а только в областях омического контакта. Рост n^+ слоя осуществляется с помощью селективной эпитаксии с использованием маски из материала, препятствующего росту во всех областях, кроме области контакта. Такие контакты, как правило, не требуют термического отжига, характеризуются гладкой морфологией поверхности и равномерным распределением сопротивления по контактной площадке. Имеющиеся данные [2–4] показывают, что, несмотря на большую сложность, технология несплавных контактов позволяет превзойти сплавные контакты по основным параметрам: сопротивлению и качеству поверхности.

Методика эксперимента. Образцы гетероструктур, используемые в работе, представляли собой выращенные на подложках сапфира диаметром 2 дюйма гетероструктуры Al_{0,05}Ga_{0,95}N/i-Al_{0,23}Ga_{0,77}N/AlN/GaN с осажденным *in-situ* слоем Si₃N₄ толщиной 115 нм. Нитрид кремния использовался в качестве маски для процесса селективного зарощивания.

После формирования топологического рисунка омических контактов методом фотолитографии проводилось плазменное травление нитрида кремния в смеси газов SF₆ и CHF₃. После удаления фоторезиста и очистки поверхности в кислородной плазме проводилось эпитаксиальное зарощивание методом МОС-гидридной эпитаксии на установке Dragon-125 в ФТИ им. Иоффе. Сильнолегированный кремнием ($>10^{19}$ см⁻³) слой Al_{0,05}Ga_{0,95}N толщиной примерно 100 нм был получен в областях формирования омических контактов.

Металлизация омических контактов формировались методом электронно-лучевого напыления в вакууме. Исследовались свойства двух составов металлизации Ti/Au и Ti/Al/Mo/Au с общей толщиной металлов 115 и 135 нм соответственно. После напыления и удаления металла взрывом образцы были разделены для проведения исследования зависимости сопротивления от режимов быстрого термического отжига (БТО) ($T = 400, 600$ и 800 °С в течение 30 с в атмосфере азота). Результаты сравнивались с сопротивлением, полученным без отжига, и с сопротивлением, полученным на аналогичной гетероструктуре без зарощивания омических контактов (для металлизации Ti/Al/Mo/Au при $T = 800$ °С).

Измерение контактного сопротивления омических контактов проводилось методом длинной линии (TLM). Конструкция тестов была скорректирована с целью минимизации погрешности, вызванной тем, что в методе не учитывается влияние на измеряемые сопротивления собственно металлизации напыляемого контакта.

Результаты и обсуждение. Анализ выращенных образцов в электронном микроскопе показал, что толщина селективно выращенного слоя зависит от размеров окна для зарощивания. В узких (порядка 1 мкм) окнах толщина зарощенного слоя неоднородна, наблюдаются отдельные островки (рис. 1). Кроме того, вблизи стенок нитрида кремния рост отсутствует. Вероятная причина этого – не догравленный до конца слой нитрида кремния, видимый на сколе (рис. 2). Очевидно, что режим травления диэлектрика для данного процесса требует корректировки. Для окон больших размеров (десятки микрон) наблюдается перепад толщины селективно выращенного слоя между краями окна и центральными областями.

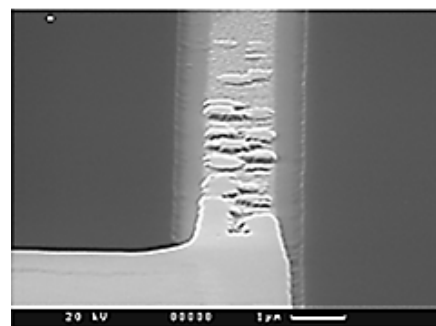


Рис. 1. Микрофотографии скола образцов после выращивания сильнолегированного слоя

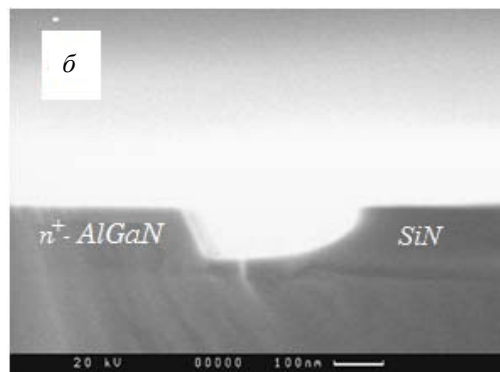
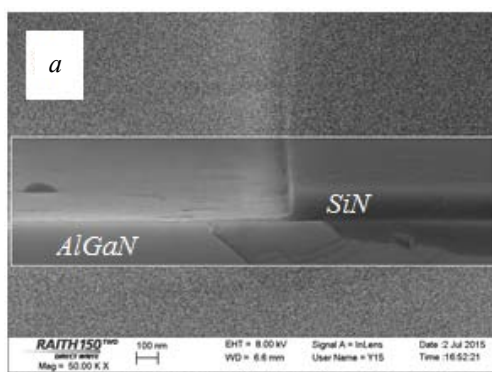
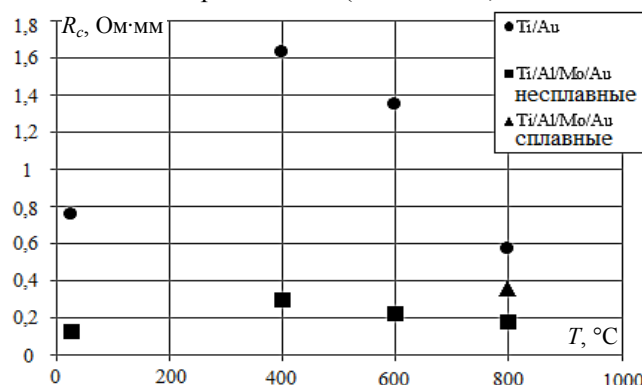


Рис. 2. Микрофотографии скола образцов после травления нитрида кремния (а) и после выращивания сильнолегированного слоя (б)

Результаты измерений контактного сопротивления на изготовленных образцах приведены на рис. 3. Для сравнения указано значение R_c , которое получается для сплавных контактов на основе Ti/Al/Mo/Au [5] на структурах без сильнолегированного слоя. Из-за неоднородности толщины селективно выращенного слоя n^+ AlGaN наблюдался разброс значений контактного сопротивления по образцу, однако можно утверждать, что как для Ti/Au, так и для Ti/Al/Mo/Au металлизаций несплавные контакты были успешно сформированы. Металлизация типа Ti/Al/Mo/Au позволяет получать омические контакты, имеющие низкие значения контактного сопротивления (вплоть до 0,125 Ом·мм – в три раза ниже сопротивления контактов на структуре без сильнолегированного слоя). Несмотря на то, что металл нижнего слоя металлизации для обоих составов был одинаков (титан), контактное сопротивление несплавных контактов отличается.

Рис. 3. Зависимость сопротивления контактов от температуры быстрого термического отжига



Это может быть связано как с неоднородностью толщины слоя n^+ , так и с различной толщиной самого слоя титана (толщина титана в металлизации Ti/Au меньше, чем в Ti/Al/Mo/Au). Последнее предположение косвенно подтверждает факт деградации характеристик Ti/Au контакта при отжиге, наблюдаемый при температуре отжига 400 °C. Диффузия золота вглубь полупроводника и окисление титана могут быть процессами, ответственными за такую деградацию.

Устойчивость омического контакта к длительному нагреву при температурах до 400 °C является важным критерием его качества. Полученные нами результаты показывают, что Ti/Au металлизация не является оптимальной для применения в транзисторных гетероструктурах.

Заключение. В данной работе было приведено исследование несплавных омических контактов к сильнолегированному $n+$ слою AlGaIn/GaN HEMT. Применение данной технологии позволяет снизить значение контактного сопротивления в три раза по сравнению со стандартными образцами и получать омические контакты, обладающие линейными вольт-амперными характеристиками без применения операций высокотемпературного отжига. Результаты проведенных исследований лягут в основу разработки промышленной технологии GaN HEMT и позволят улучшить их параметры.

Дальнейшие исследования будут проводиться на тему отработки методов травления диэлектрика и получения более качественных эпитаксиальных пленок, а также оптимизации толщин и материалов металлизации.

Литература

1. Optimization of AlGaIn/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.
2. Pang L. Analysis of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with nonalloyed Ohmic contacts achieved by selective area growth using plasma assisted molecular beam epitaxy / L. Pang, K. Kim // Journal of Engineering. – 2014. – P. 8–13.
3. Ultra-low resistance ohmic contacts to GaN with high Si doping concentrations grown by molecular beam epitaxy / F.A. Faria, J. Guo, P. Zhao et al. // Applied Physics Letters (New York). – 2012. – Vol. 101, № 3. – P. 032109.
4. Enhancement-Mode AlN/GaN/AlGaIn DHFET With 700-mS/mm gm and 112-GHz ft / A.L. Corrion, K. Shinohara, D. Regan, I. Milosavljevic, et al. // IEEE Electron Device Letters. – 2010. – Vol. 31, № 10. – P. 1116.
5. Великовский Л.Э. Оптимизация омических контактов к AlGaIn/GaN-транзисторам с высокой подвижностью электронов / Л.Э. Великовский, П.Е. Сим // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 3 (33). – С. 66–69.

Скубо Валерия Васильевна

Студентка каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: +7-923-427-42-08
Эл. почта: lerochka_2009@mail.ru

Сим Павел Евгеньевич

Аспирант каф. физической электроники ТУСУРа
Тел.: +7-923-417-11-10
Эл. почта: nezt@ya.ru

Великовский Леонид Эдуардович

Главный технолог НПК «Микроэлектроника», НПФ «Микран», Томск
Тел.: +7-913-880-13-41
Эл. почта: level@micran.ru

Поливанова Юлия Николаевна

Инженер 2-й категории НПК «Микроэлектроника», НПФ «Микран», Томск
Тел.: +7-923-502-05-79
Эл. почта: uropolivanova@bk.ru

Цацульников Андрей Федорович

Канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Тел.: +7-812-297-31-82
Эл. почта: andrew@beam.ioffe.ru

Skubo V.V., Sim P.E., Velikovskiy L.E., Polivanova Y.N., Tsatsul'nikov A.F.

Investigation of properties of nonalloyed ohmic contacts to the heterostructure AlGaIn/GaN

In this paper we discuss formation of Ti/Au and Ti/Al/Mo/Au-based nonalloyed ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructure. Selective epitaxy of highly doped $n+\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ was used for this. Obtained contacts were annealed at different temperatures and R_c and $I-V$ characteristics were obtained and examined.

Keywords: nonalloyed ohmic contacts, contact resistance, AlGaIn/GaN heterostructure, selective epitaxy of GaN.