

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К ГЕТЕРОСТРУКТУРАМ AlGaN/GaN НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

А.Д. Юник, А.И. Занько, Ю.М. Кукуть, Е.В. Васин, В.С. Упирова,
С.А. Демидович, А.Н. Фундаренко, Я.А. Соловьев
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца 121А, Минск 220108, Беларусь, jsolovjov@integral.by

Работа посвящена установлению влияния условий быстрой термической обработки гетероструктур $Al_{0.25}GaN_{0.75}/GaN$ на подложках из карбида кремния и монокристаллического кремния, содержащих нанесенную на поверхность металлизацию $Ti/Al/Ni/Au$ с толщинами слоев 20, 120, 40 и 40 нм соответственно на контактное сопротивление и максимальный ток через гетероструктуру. Топологию металлизации контактов формировали взрывной фотолитографией. Быструю термическую обработку контактов проводили путем контактного нагрева подложек с гетероструктурами от карбид-кремниевого подложкодержателя закрытого типа, нагреваемого потоком некогерентного излучения от кварцевых галогенных ламп при температуре от 650 до 800 °C в атмосфере азота. Измерениями вольтамперных характеристик на специальных тестовых структурах установлено, что при температуре быстрой термообработки ~ 700 °C для идентичного дизайна гетеропереходов AlGaN/GaN обеспечиваются минимальные уровни удельных сопротивлений контактов менее $1 \cdot 10^{-5}$ Ом·см² для обоих типов подложек. При этом за счет существенно меньшей толщины буферного слоя для подложки из карбида кремния достигается увеличение максимального тока через двумерный электронный газ более чем в 1.5 раза по сравнению с монокристаллическим кремнием.

Ключевые слова: нитрид галлия; карбид кремния; гетероструктура; быстрая термическая обработка; омический контакт, вольтамперная характеристика; контактное сопротивление.

FABRICATION OF OHMIC CONTACTS TO GaN/AlGaN HETEROSTRUCTURES ON SILICON CARBIDE SUBSTRATES BY RAPID HEAT TREATMENT

Andrey Yunik, Andrey Zanko, Yuri Kukut, Evgeny Vasin, Vladislava Upirova,
Sergey Damidovich, Alexey Fundarenko, Jaroslav Solovjov
JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,
121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, jsolovjov@integral.by

The present work is devoted to establishing the effect of the conditions of rapid heat treatment of heterostructures on the contact resistance and maximum current through the $Al_{0.25}GaN_{0.75}/GaN$ heterostructure formed on insulating substrates of silicon carbide and boron-doped substrates of single-crystal silicon. Metallization of ohmic contacts containing layers of titanium, aluminum, nickel, and gold with thicknesses of 20, 120, 40, and 40 nm, respectively, was applied to the surface of AlGaN by electron beam evaporation. The metallization topology of the contacts was formed by lift-off technique using a negative photoresist of 2.7 microns thick. Rapid thermal processing was carried out by contact heating of substrates with heterostructures from a closed-type silicon carbide substrate holder heated by a stream of incoherent radiation from quartz halogen lamps at temperatures from 650 to 800 °C in a nitrogen ambient. Measurements of the volt–ampere characteristics on special test structures have established that at a rapid heat treatment temperature of about 700 °C for an identical design of AlGaN/GaN heterojunctions, minimum contact resistivity levels of less than $1 \cdot 10^{-5}$ ohms·cm² are achieved for both types of substrates. At the same time, due to the significantly lower thickness of the buffer layer, due to a better match between the parameters of crystal lattices and temperature coefficients of thermal expansion, an increase in the maximum current through a two-dimensional electron gas is achieved for a silicon carbide substrate by more than 1.5 times compared with single-crystal silicon.

Keywords: gallium nitride; silicon carbide; heterostructure; rapid heat treatment; ohmic contact, volt–ampere characteristics; contact resistance.

Введение

Образование на границе гетероперехода AlGaN/GaN области двумерного электронного газа (ДЭГ) позволяет создавать транзисторы с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ), широко применяемые в новом поколении элементной базы силовой электроники благодаря их лучшей энергоэффективности и более высокой радиационной, температурной, химической и механической стойкости по сравнению с кремниевыми полевыми транзисторами, благодаря большей ширине запрещенной зоны, высокой электрической прочности, высокой скорости насыщения электронов.

В современных изделиях силовой электроники гетероструктуры AlGaN/GaN формируют на поверхности подложек монокристаллического Si. Однако существенная разница в постоянных кристаллических решеток, а также температурных коэффициентах линейного расширения между Si и GaN требует использования достаточно толстых переходных слоев, что ограничивает надежность и качество таких гетероструктур и изделий на их основе.

В то же время SiC характеризуется близкими к GaN параметром решетки (0.3073 и 0.319 нм соответственно) и температурным коэффициентом линейного расширения (3.1 и $3.2 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ соответственно), а также лучшей теплопроводностью (348 и 149 $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ соответственно), что позволяет формировать на SiC подложках низкодефектные гетероструктуры AlGaN/GaN с буферными слоями минимальной толщины и обеспечивать улучшенные параметры ТВПЭ на их основе [1].

Наряду с параметрами ДЭГ на максимальный ток стока и сопротивление сток-исток в открытом состоянии ТВПЭ влияет сопротивление омических контактов к области ДЭГ. Как правило, в гетероструктурах AlGaN/GaN их формируют из многослойной металлизации на основе Ti и Al с последующим ее вжиганием быстрой термообработкой (БТО) подложек при температуре от 600 до 900 °C [2, 3]. Хорошие омические контакты должны иметь удель-

ное контактное сопротивление менее $10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Настоящая работа посвящена установлению влияния условий быстрой термообработки гетероструктур AlGaN/GaN/SiC с металлизацией Ti/Al/Ni/Au на контактное сопротивление и максимальный ток через гетероструктуру.

Материалы и методы исследований

В работе использовались гетероструктуры AlGaN/GaN на подложках из нелегированного карбида кремния с ориентацией (0001) (рис. 1, а) и легированного бором кремния с удельным сопротивлением 0.01 Ом·см и ориентацией (111) (рис. 1, б).

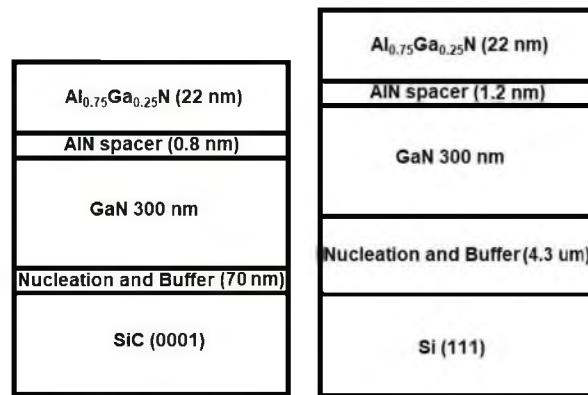


Рис. 1. Дизайн гетероструктур AlGaN/GaN: а – на SiC подложке; б – на Si подложке

Металлизацию контактов формировали взрывной фотолитографией с использованием негативного фоторезиста толщиной 0.9 мкм и нанесением слоев Ti/Al/Ni/Au толщиной 20, 120, 40 и 40 нм соответственно электронно-лучевым испарением. Вжигание проводили БТО при температуре от 650 до 800 °C контактным нагревом от SiC подложкодержателя закрытого типа, нагреваемого потоком некогерентного излучения от кварцевых галогенных ламп.

Контактное сопротивление измеряли на тестовых структурах по методу длинной линии. Максимальный ток через гетероструктуру определяли из вольтамперных характеристик на изолированных тестовых структурах.

Результаты и их обсуждение

Формирование омического контакта к гетероструктуре AlGaN/GaN на SiC подложке наблюдается при температуре БТО от 675 °C (рис. 2). При температуре БТО 700 °C контактное сопротивления достигает минимума на уровне от $3 \cdot 10^{-6}$ до $8 \cdot 10^{-6}$ Ом·см 2 , что обусловлено максимальным приближением низкоомного слоя AlGaN к области ДЭГ.

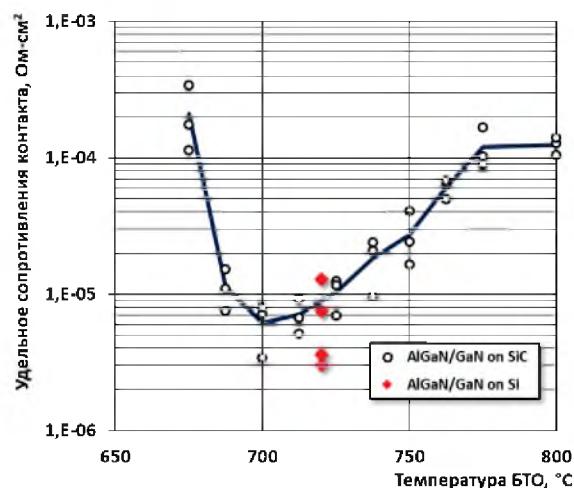


Рис. 2. Зависимость контактного сопротивления к гетероструктуре AlGaN/GaN/SiC от температуры БТО

Увеличение температуры БТО до 750 °C вызывает рост контактного сопротивления до уровня $1 \cdot 10^{-5}$ Ом·см 2 , обусловленный деградацией ДЭГ в области контактов вследствие диффузионного перемешивания компонентов металлизации и гетероструктуры глубже границы раздела AlGaN–GaN [4].

Аналогичная зависимость наблюдается и для гетероструктур AlGaN/GaN на кремниевых подложках, где при температуре БТО 720 °C контактное сопротивления находится на уровне от $3 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ Ом·см 2 . Данный факт обусловливается идентичностью дизайна верхних слоев гетероструктуры, металлизации и условий БТО при формировании омических контактов.

Однако сопоставление максимального тока через ДЭГ гетероструктур для SiC и Si подложки после формирования омических

контактов при оптимальных температурных условиях показывает, что для SiC подложки его удельная величина достигает 1.1 А/мм, что более чем в 1.5 раза превышает данный показатель для Si подложки (0.71 А/мм). Это указывает на лучшие характеристики канала ДЭГ при идентичном дизайне гетероперехода AlGaN/GaN на SiC подложках по сравнению с монокристаллическим кремнием, что связано с меньшей толщиной буферного слоя, обусловленной лучшим соответствием параметров SiC и GaN по сравнению с кремнием.

Заключение

Установлено влияние условий быстрой термической обработки гетероструктур AlGaN/GaN с металлизацией Ti/Al/Ni/Au на контактное сопротивление и максимальный ток через гетероструктуру на подложках из SiC и монокристаллического кремния. Показано, что при температуре БТО ~ 700 °C для идентичного дизайна гетеропереходов AlGaN/GaN обеспечиваются минимальные уровни удельных сопротивлений контактов менее $1 \cdot 10^{-5}$ Ом·см 2 для обоих типов подложек. При этом за счет существенно меньшей толщины буферного слоя для подложки из карбида кремния достигается увеличение максимального тока через ДЭГ более чем в 1.5 раза по сравнению с монокристаллическим кремнием.

Библиографические ссылки

1. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия. Москва: Техносфера; 2011. 592 с.
2. Greco G, Iucolano F., Roccaforte F. Ohmic contacts to Gallium Nitride materials. *Applied Surface Science* 2016; 383: 324-345.
3. Буслюк В.В., Видрицкий А.Э., Голосов Д.А., Емельянов В.В., Завадский С.М., Ланин В.Л. и др. Технологические аспекты производства изделий субмикронной электроники. Минск: Бестпринт; 2024. 266 с.
4. Юник А.Д., Соловьев Я.А., Жигулин Д.В. Влияние температуры быстрого термического отжига на электрофизические свойства омического контакта металлизации Ti/Al/Ni к гетероструктуре GaN/AlGaN. *Доклады БГУИР* 2022; 20(3): 13-19.