

УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ



УДК 621.382

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ Ti/Al/Ni/Au ДЛЯ ДИОДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

А.В.Желаннов, В.Е.Удальцов, А.В.Падорин*

Институт электронных и информационных систем НовГУ, zhelannovav@mail.ru

* ОАО «ОКБ-Планета»

Представлено исследование параметров контактов на основе системы металлизации Ti/Al/Ni/Au к эпитаксиальным пленкам GaN *n*-типа проводимости. Рассмотрено влияние толщины металлизации и параметров отжига (температура и время) на электрофизические (вольт-амперная характеристика, величина удельного контактного сопротивления), структурные (морфология поверхности) параметры контактной системы. Для металлизации Ti(40nm)/Al(160nm)/Ni(40nm)/Au(150nm) получено значение удельного контактного сопротивления $2 \cdot 10^{-5}$ Ом·см².

Ключевые слова: нитрид галлия, омический контакт, высокотемпературный отжиг, удельное контактное сопротивление, морфология поверхности

The study based on the parameters of the contact system metallization of Ti/Al/Ni/Au in epitaxial films of GaN *n*-type conductivity is presented. The influence of the thickness of metallization and annealing parameters (temperature and time) on the electrical (volt-ampere characteristic, the value of specific contact resistance), structural (surface morphology) parameters of the contact system is considered. For metallization Ti (40nm)/Al (160nm)/Ni (40nm)/Au (150nm) the value of specific contact resistance is $2.0 \cdot 10^{-5}$ Ω·cm².

Keywords: gallium nitride, ohmic contact, high-temperature annealing, specific contact resistance, surface morphology

Введение

Прямозонный полупроводник GaN и твердые растворы на его основе являются перспективными материалами для создания приборов в различных областях электроники. Большая ширина запрещенной зоны нитрида галлия и возможность изменять эту величину для системы твердых растворов на его основе позволяют использовать нитриды для создания оптоэлектронных приборов в диапазоне длин волн от видимой до глубокой ультрафиолетовой областей. Однако чтобы реализовать преимущества нитридов для получения высокоэффективных приборов, необходима отработанная технология получения стойких омических контактов к *n*-слоям полупроводника.

Низкое удельное сопротивление, высокая надежность при повышенных температурах и хорошая воспроизводимость омических контактов являются важнейшими факторами, которые ограничивают выходные характеристики приборов. Кроме того, гладкая морфология поверхности имеет важное значение для получения резкого края контакта. К настоящему времени предложено и изучено большое количество систем металлизации омических контактов для приборных структур на основе GaN. Среди них наиболее распространенной является система на основе Ti/Al. Такая металлизация может быть описана в виде Ti/Al/X(Ni, Ti, Mo, Pt, Pd)/Au [1-6].

Многослойная система Ti/Al/Ni/Au является одной из основных для получения омических контактов к приборным структурам. Исследование электрических, морфологических и микроструктурных свойств данной

металлизации в зависимости от условий отжига представлены в [1-3]. В работах [3-6] представлены исследования корреляции между исходным составом металлизации и контактными свойствами. В этих же работах представлены исследования зависимости сопротивления контакта и морфологии поверхности от соотношения толщины Al/Ti. Первый слой Ti, непосредственно контактируя с GaN, играет значительную роль в формировании омических контактов при отжиге. Al в свою очередь, реагируя с Ti, формирует слой Al₃Ti, предотвращая окисление Ti [1,2]. Третий слой, Ni (Ti, Mo, Pt, Pd и т.д.) выступает в качестве диффузионного барьера, разделяя алюминий и золото. Таким образом, наиболее существенное влияние на формировании омического контакта влияют первые два слоя, и поэтому важно определить влияние соотношения между слоем Ti и последующим слоем Al (Al/Ti) на электрические и морфологические свойства контакта [5].

В данной работе представлены исследования электрических характеристик и морфологии поверхности в зависимости от соотношения толщины Ti и Al в системе металлизации Ti/Al/Ni/Au для омических контактов в приборах на основе GaN.

План эксперимента

Эксперимент проводился на двухдюймовых сапфировых подложках с эпитаксиальными слоями, выращенными методом химического осаждения из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений. Параметры слоев эпитаксиальных структур представлены на рис.1.

$n\text{-GaN (Si: } 7 \cdot 10^{15} \text{ — } 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}) \sim 2 \text{ мкм}$
Буфер GaN 10^{16} 1,5 мкм
Сапфир 430 мкм

а)

$n\text{-GaN (Si: } 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}) 0,3 \text{ мкм}$
$n\text{-GaN (Si: } (5\text{-}7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}) \sim 2 \text{ мкм}$
Буфер GaN 10^{16} ~1,5 мкм
Сапфир 430 мкм

б)

$n\text{-GaN (Si: } 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}) 0,3 \text{ мкм}$
$n\text{-GaN (Si: } 1,1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}) 2 \text{ мкм}$
Буфер GaN 10^{16} 1,5 мкм
Сапфир 430 мкм

в)

Рис.1. Эпитаксиальные структуры, используемые в работе

Оптимизация контактов заключается в подборе оптимального соотношения толщины Al/Ti. Параллельно проводится определение влияния режимов отжига на параметры контактов. Составы металлизации и параметры отжига представлены в нижеприведенной таблице.

Параметры металлизации и отжига, исследуемые в работе

Металлизация		Параметры отжига	
Al/Ti	Ti/Al/Ni/Au, нм	Температура отжига, °С	Время отжига, с
2	20/40/40/150	700	30, 60, 90, 120
4	20/80/40/150	800	30, 45, 60, 90, 100, 120
6	20/120/40/150	900	15, 30, 60, 90
8	20/160/40/150	Среда отжига — азот	

Для исследования контактных параметров создавались тестовые ячейки, представленные на рис.2. Значение расстояния s_c между контактами составляет величину от 1 до 50 мкм. Контакты формировались методом электронно-лучевого напыления с применением взрывной фотолитографии. В работе использовался специальный фоторезист ФПН-20-ИЗО, обеспечивающий отрицательный профиль. Достигается это с помощью обращения скрытого позитивного изображения. После формирования контактов производился быстрый отжиг в атмосфере азота. Температурная обработка проводилась в кварцевой газопроводной трубе с внешними резистивными нагревателями.

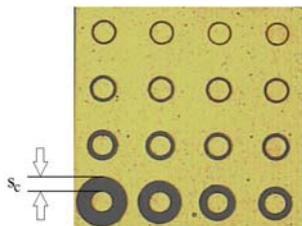


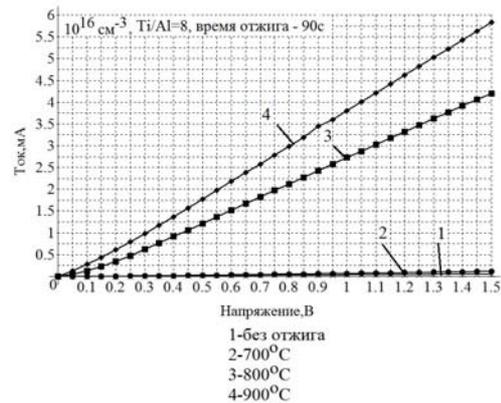
Рис.2. Тестовая ячейка для определения удельного контактного сопротивления

Результаты эксперимента

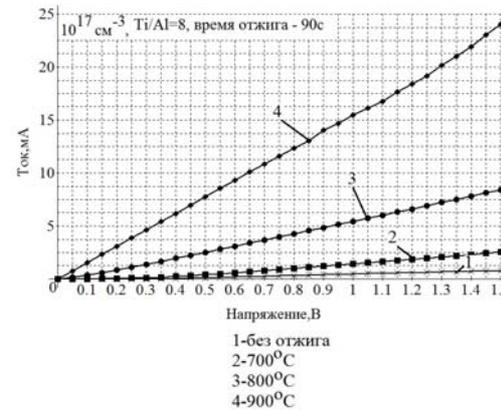
В ходе выполнения работы были изготовлены экспериментальные образцы размером 6×6 мм, на которых проводились исследования контактных параметров. В первую очередь исследовались вольт-амперные характеристики контактов. Измерения проводились на полуавтоматической зондовой станции Cascade Microtech 12000S. В качестве измерительной части для контроля параметров на постоянном токе использовался измеритель характеристик полупроводниковых приборов Agilent B1500A.

А. Вольт-амперная характеристика

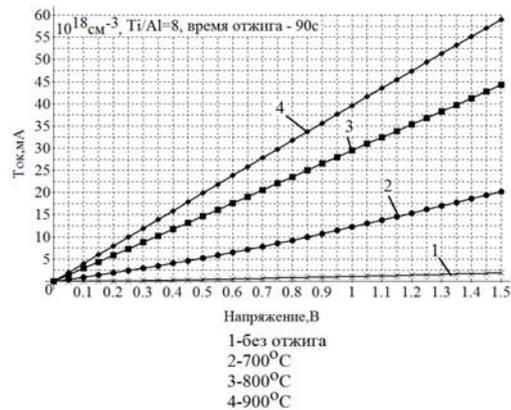
ВАХ экспериментальных образцов представлены на рис.3.



а)



б)



в)

Рис.3. Вольт-амперные характеристики образцов при разных концентрациях легирующей примеси

Как видно из рис.3, действие температуры оказывает одинаковое влияние на ВАХ контактов, изготовленных на структурах с разным уровнем легирования. Отметим, что как и при повышении температуры отжига, так и при увеличении уровня легирования, сопротивление контакта уменьшается.

Б. Удельное контактное сопротивление

Удельное контактное сопротивление определяет качество омического контакта. Создание высококачественных омических контактов является одной из важнейших задач при изготовлении полупроводникового прибора, поэтому необходим контроль параметров на различных стадиях технологического процесса изготовления.

Определение контактного сопротивления производилось с помощью метода длинной линии (Transmission Length Method или TLM-метод). Этот метод основан на измерении полного сопротивления между двумя контактами как функции расстояния между ними. Если эти данные экстраполировать к нулевому расстоянию, то получим сумму контактных сопротивлений каждого контакта. Используя эти данные, можно вычислить величину удельного контактного сопротивления. В работе используется метод длинной линии с радиальной топологией контактов. Радиальная структура метода TLM показана на рис.4 [6].

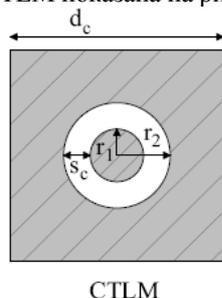


Рис.4. Пример радиальной топологии метода TLM

В круговых контактах ток течет радиально. Предполагая, что контакты являются электрически длинными, т. е. $(d_c - 2r_2) \gg L_t$ и $r_1 \gg L_t$, можно определить общее сопротивление:

$$R_{tot} = \frac{R_{sh} R_{sh,c}}{2\pi} \left[\frac{1}{R_{sh,c}} \ln \left(\frac{r_1 + s_c}{r_1} \right) + \frac{L_t}{R_{sh}} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1 + s_c} \right) \right],$$

где первое слагаемое внутри больших скобок связано с сопротивлением между контактами. Второе и третье слагаемые связаны с сопротивлением внутреннего и внешнего контакта соответственно. L_t — длина растекания тока, которая может быть определена из выражения

$$L_t = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{sh,c}}},$$

где ρ_c — удельное контактное сопротивление, а $R_{sh,c}$ — поверхностное сопротивление полупроводника под контактом, R_{sh} — поверхностное сопротивление полупроводника.

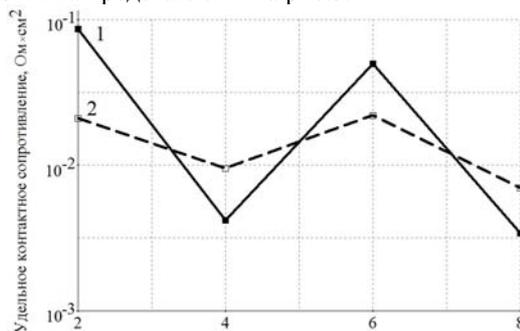
Значение s_c , для которого полное сопротивление равно нулю, может быть вычислено из следующего выражения:

$$-s_c(y=0) = \frac{2R_{sh,c}L_t}{R_{sh}}.$$

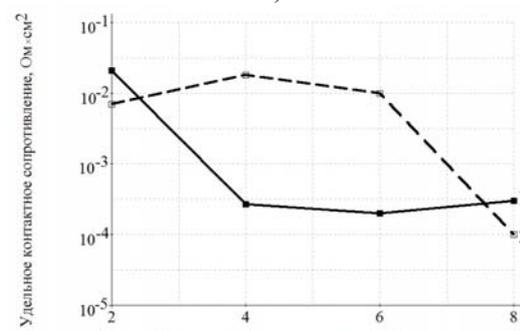
Это значение может быть использовано для вычисления удельного контактного сопротивления:

$$\rho_c = \left(\frac{s_c(y=0)}{2} \right)^2 \frac{R_{sh}^2}{R_{sh,c}}.$$

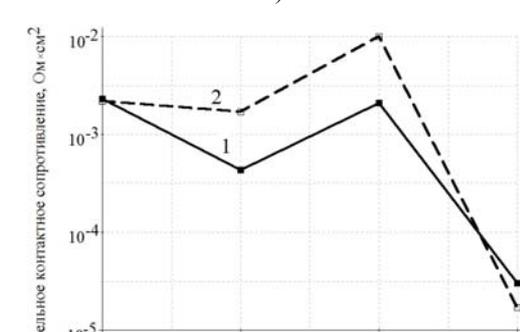
Поскольку задачей исследования является подбор оптимального соотношения толщины Ti и Al, то представляет интерес зависимость удельного контактного сопротивления от толщины металлизации при заданных параметрах отжига. С нашей точки зрения, интерес представляют следующие режимы отжига: $T = 800, 900^\circ\text{C}$, время отжига – 90 с. Данные режимы позволяют оценить динамику изменения параметров контактов. Зависимости удельного контактного сопротивления от соотношения Al/Ti и температуры отжига представлены на рис.5.



а)



б)



в)

Рис.5. Зависимость удельного контактного сопротивления от соотношения толщины Al/Ti. а) уровень легирования 10^{16} см^{-3} , б) уровень легирования 10^{17} см^{-3} , в) уровень легирования 10^{18} см^{-3}

Анализ данных, представленных на рис.5, показывает, что при заданном уровне легирования удельное контактное сопротивление уменьшается как при увеличении температуры отжига, так и при увеличении времени отжига. Подобная картина наблюдается для всех уровней легирования. Из рисунка видно также, что система металлизации с соотношением Al/Ti, равным 8, обеспечивает получение минимального значения удельного контактного сопротивления. Это справедливо для любого из выбранных нами уровней легирования.

Представляет интерес проследить влияние уровня легирования контактного слоя на значение сопротивления контакта. Зависимость удельного контактного сопротивления от уровня легирования контактного слоя для системы металлизации с соотношением Al/Ti, равным 8, представлена на рис.6.

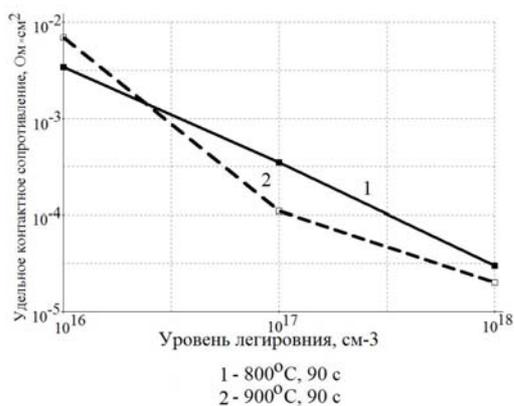


Рис.6. Зависимость сопротивления контакта от уровня легирования

Из рисунка видно, что в соответствии с теорией формирования омических контактов сопротивление последнего уменьшается при увеличении уровня легирования контактного слоя.

В. Морфология поверхности

При изготовлении приборов СВЧ и оптоэлектроники морфология омических контактов играет важную роль. Неровная морфология может приводить к трудностям в дальнейшей распайке выводов и искажению края контакта, нарушая геометрические размеры. Поэтому наряду с сопротивлением контакта необходимо оценивать его морфологию (шероховатость). Фотографии морфологии поверхности образцов металлизации с различным соотношением Al/Ti, полученные в сканирующем электронном микроскопе, представлены на рис.7.

Исследовав морфологию всех экспериментальных образцов, можно сделать следующие выводы. Во-первых, при увеличении уровня легирования количество образцов с приемлемой морфологией увеличивается. Во-вторых, при данном уровне легирования морфология поверхности улучшается у образцов с меньшим соотношением Al/Ti. В-третьих, увеличение времени отжига улучшает морфологию.

Заключение

Результаты исследования контактных систем на основе металлизации Ti/Al/Ni/Au показывают, что электрические свойства и морфология поверхности зависят от соотношения между толщиной Ti и Al. Увеличение толщины Al приводит к уменьшению контактного сопротивления. При соотношении Al/Ti, рав-

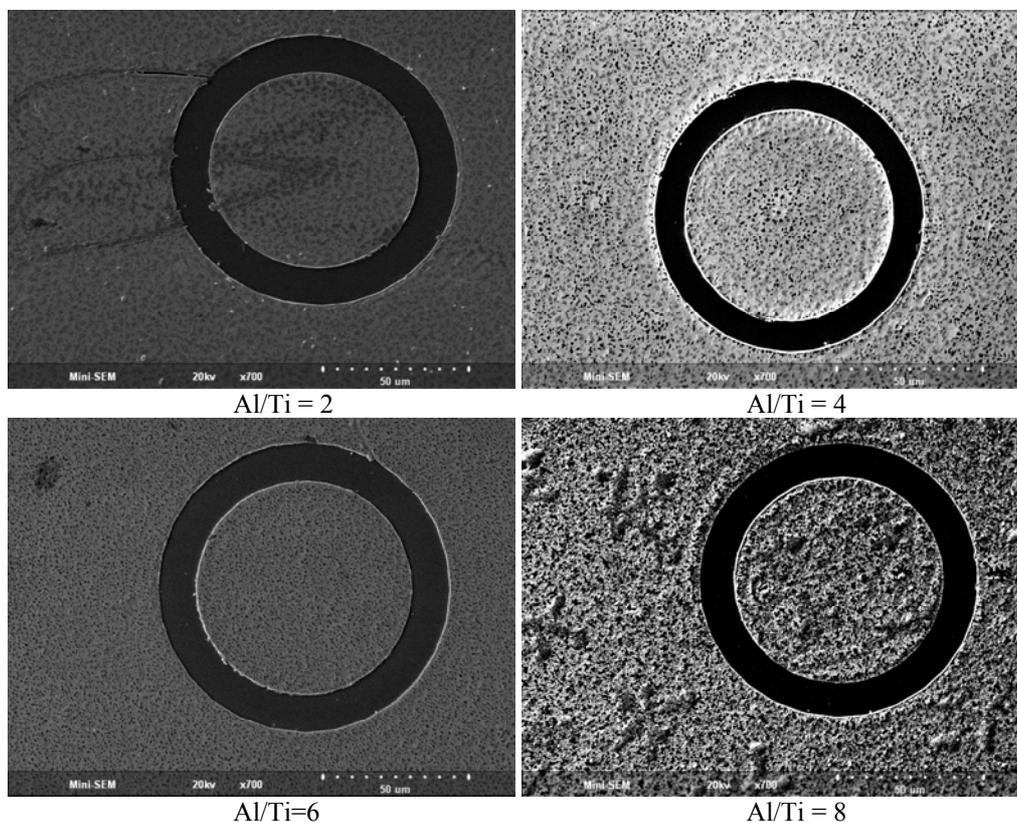


Рис.7. Морфология поверхности, $\times 700$. Уровень легирования 10^{18} см^{-3} , режим отжига 900°C , 90 с

ном 8, значение удельного контактного сопротивления составляет $2 \cdot 10^{-5}$ Ом·см².

Анализ морфологии поверхности показывает, что уменьшение толщины Al приводит к более гладкой морфологии поверхности, однако удельное контактное сопротивление при этом значительно увеличивается.

1. Van Daele B., Van Tendeloo G., Ruythooren W. // Appl. Phys. Lett. 2005. V.87. P.061905.
2. Fay M.W., Moldovan G., Brown P.D. // J. Appl. Phys. 2002. V.92. P.94.
3. Davydov A.V. et al. // Phys. Status Solidi C. 2005 .Vol.2. P.2551.
4. Bardwell J.A., Haffouz S., Tang H. // J. Electrochem. Soc. 2006. Vol.153. Issue 8. P.G746-G749.
5. Kolaklieva L., Kakanakov R., Cimalla V. // IEEE Electron Devices Society: 26th International Conference on Microelectronics: Proceedings. Vol.1: Nis, Serbia, 11-14 May 2008. P.221-224.
6. Janes K.H., Webb D.B. // Electron Devices. IEEE Transactions. 1996. Vol.43. Issue 5. P.676-684.