

*Рогачёв И.А., Князьков А.В., Мешков О.И., Курочка А.С.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»*

Исследование и разработка технологических процессов формирования омических контактов и затвора AlGaIn/GaN НЕМТ

Представлены результаты исследования технологических процессов формирования омических контактов Ti/Al/Ni/Au и затвора Ni/Au к гетероструктурам AlGaIn/GaN. Исследовано влияние травления полупроводникового слоя в местах формирования контактов на удельное сопротивление, получены минимальные значения сопротивлений 0,4 Ом·мм. Рассмотрено влияние капсулирования омических контактов на их морфологию поверхности.

Введение

Современные тенденции развития электроники направлены на миниатюризацию полупроводниковых приборов. Для мощной СВЧ электроники, во многом этому способствует применение материалов типа А^{III}В^V и ещё более широкозонных полупроводников типа III-N. Благодаря большой ширине запрещённой зоны получают большие плотности мощности. В частности, приборы, изготовленные на гетероэпитаксиальных структурах AlGaIn/GaN дают в несколько раз большие плотности мощности, чем традиционно используемые арсенид галлиевые приборы[1].

Изготовление транзистора или МИС на нитриде галлия требует особого подхода при формировании отдельных его элементов, в особенности омических контактов и затвора.

Создание омического контакта является сложной задачей, так как ширина запрещённой зоны у этого типа полупроводников более чем в два раза больше, чем у арсенида галлия.

При создании омических контактов на гетероструктурах AlGaIn/GaN возникают трудности с получением низкого сопротивления и низкой шероховатости поверхности металлических слоёв после процесса вжигания.

Традиционно, для формирования омических контактов используют металлизацию на основе титана и алюминия, далее напыляют металл, который служит барьерным слоем между алюминием и верхней металлизацией – золотом. Однако, из литературы известно большое разнообразие наборов металлических слоёв, которые обеспечивают низкое сопротивление и морфологию верхних металлических слоёв[2].

С целью уменьшения удельного сопротивления омического контакта используют углубления под омические контакты, рецесс (recess). Из литературы известно, что существует параболическая зависимость удельного сопротивления контактов от глубины рецесса, рис. 1.

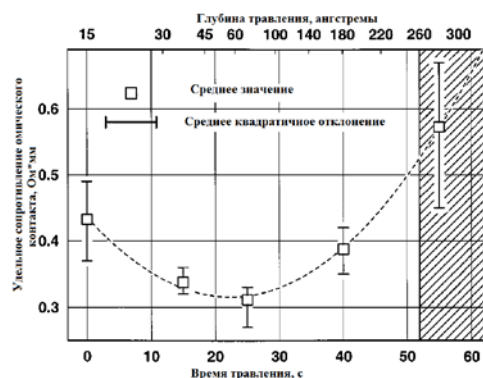


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления омических контактов от глубины травления. Заштрихованная область – область образования двумерного электронного газа[3].

Отдельное внимание необходимо уделить процессу быстрого термического отжига омических контактов. Применяют как одностадийный, так и многостадийный режимы вжигания, при этом процессы диффузии и протекание химических реакций отличается кардинальным образом.

В целях сохранения морфологии и геометрии омических контактов применяют капсулирование – пассивация омических контактов слоем диэлектрика непосредственно перед процессом вжигания металлических слоёв, что в значительной степени уменьшает шероховатость и сохраняет форму контактов.

Процесс формирования затвора напрямую влияет на важнейшие характеристики транзистора, такие как крутизна, величина токов насыщения, пробивные напряжения, напряжение отсечки.

Наиболее подходящими металлами для формирования контакта Шотки к AlGaN являются Pt и Ni, так как имеют наибольшую высоту потенциального барьера 1,55 и 1,05 соответственно, но так как Pt более дорогой материал, то традиционно, для формирования контакта Шотки используют Ni[4].

Эксперимент

На этапе исследования процессов формирования омических контактов были получены зависимости удельного сопротивления от толщин напыляемых металлов, температур вжигания и глубины рецесса.

Формирование затвора проводили после предварительной обработки поверхности полупроводника сухим (RIE BCl_3) и жидкостным ($\text{H}_2\text{O}:\text{HCl}$ 1:1) методами, был проведён рецесс на разную глубину и пассивация затвора.

В качестве исходного материала использовались гетероэпитаксиальные структуры AlGaN/GaN (рис. 2) на сапфировых подложках, структуры были выращены на предприятии «Элма-Малахит».

Слой AlGaN, н/л 17 нм, $x(\text{Al})=0.31$
AlN 0.7 нм
Буфер GaN 2500 нм
Сапфир (0001) 0.43 мм

Рис. 2. Схематичное изображение используемой гетероэпитаксиальной структуре.

На тестовых структурах была сформирована меза-изоляция путём травления в плазме смеси газов Cl_2/BCl_3 в индуктивно-связанной плазме на установке «Corial 200IL», также этот режим травления использовался для рецесса под омические контакты и затвор.

Напыление металлизации для омических контактов (Ti/Al/Ni/Au) и затвора (Ni/Au) проводилось методом вакуумного термического испарения.

Вжигание омических контактов проводили на установке быстрого термического отжига «As-one». Процесс вжигания проводился двухстадийно, первая стадия – нагревание до 600°C и отжиг при этой температуре в течение 30 секунд, затем нагревание до заданной температуры и отжиг в течение 40 секунд.

Измерения осуществились при помощи TLM метода (метода длинных линий), для этого были сформирована линейная матрица TLM элементов, измерения проводили на зондовой станции.

В качестве капсулирующего и пассивирующего слоя использовался слой диэлектрика Si_3N_4 , осажденный на установке стимулированного плазмой химического осаждения из газовой фазы «Corial D250».

Результаты экспериментов

Формирование омических контактов

В эксперименте использовались различные толщины металлических слоёв для формирования омических контактов. Также применялись разные температуры вжигания. Результаты исследования представлены на рис. 3.

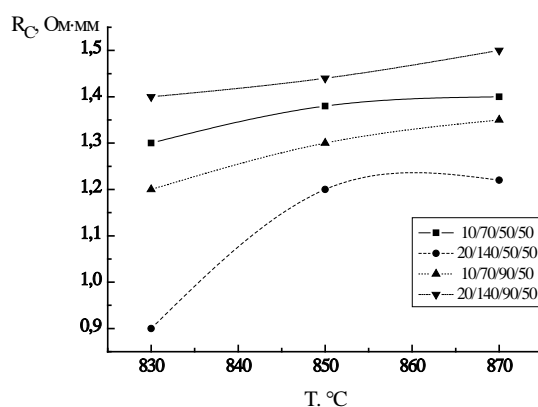


Рис. 3. Зависимость сопротивления омических контактов от состава металлических слоёв Ti/Al/Ni/Au и температуры вжигания.

Как видно из рис. 3, при повышении температуры вжигания, также возрастает и удельное сопротивление омического контакта. Минимальное сопротивление было получено для состава слоёв металлов Ti/Al/Ni/Au с толщинами 20/140/50/50 нм. соответственно, при температуре вжигания 830°C в течение 40 секунд без рецесса. На данном этапе исследования сложно объяснить такую зависимость удельного сопротивления омических контактов от условий их получения. Полученные значения удельного сопротивления, получились больше, чем литературные (0,2-0,7 Ом·мм), поэтому, требуется ещё большее уменьшение сопротивления.

Для дальнейшего уменьшения удельного сопротивления омических контактов было использовано формирование углубления под омические контакты (рецесс). Травление полупроводникового слоя на месте формирования омического контакта проводили в индуктивно связанной плазме в смеси газов Cl_2/BCl_3 .

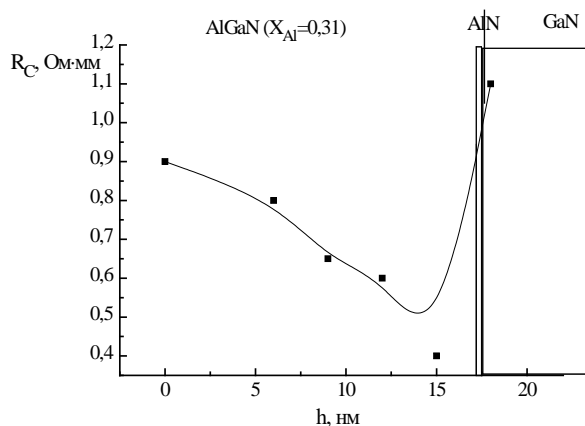


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления омических контактов Ti/Al/Ni/Au 20/140/50/50 нм от глубины залегания омического контакта, температура вжигания 830°C в течение 40 сек.

Как видно из рис. 4, удельное сопротивление омического контакта уменьшается по мере приближения границы омического контакта к области двумерного электронного газа, затем резко возрастает при пересечении проводящего канала гетероструктуры. Данную зависимость можно объяснить следующим образом. При травлении слоя полупроводника, уменьшается его количество, которое реагирует с нижележащими слоями металлов, благодаря чему, взаимодействие металлов с полупроводником при температурном воздействии проходит более полно и в результате уменьшается сопротивление омического контакта. При залегании нижних слоёв металлов ниже области двумерного электронного газа, сопротивление контакта резко растёт, так как образование низкоомных продуктов реакции происходит ниже проводящего канала, а хорошего омического контакта металла с двумерным электронным газом не происходит.

Таким образом, было получено минимальное сопротивление омического контакта 0,4 Ом·мм.

С целью улучшения морфологии омических контактов после вжигания был применен метод капсулирования, который состоит в том, что перед процессом быстрого термического отжига всю поверхность пластины покрывают слоем диэлектрика. Таким образом, форма металлических слоёв омических контактов фиксируется с одной стороны поверхностью полупроводника, а с трёх других плёнкой диэлектрика, благодаря этому она сохраняется при высокотемпературном воздействии.

На рис. 5 представлены изображения омических контактов до и после вжигания. Видно, что без диэлектрического слоя происходит нарушение морфологии и геометрии металлических слоёв. При использовании слоя нитрида кремния толщиной 100 нм геометрия контакта сохраняется, но при этом происходит разрушение слоя диэлектрика. Также происходит образование «облаков». Величина сопротивления при этом равна $0,5 \pm 0,07$ Ом·мм.

При использовании более тонкого диэлектрика – 30 нм, разрушения капсулирующего слоя не происходит, геометрия контакта полностью сохраняется, а нарушение морфологии поверхности не существенно. Величина сопротивления при этом равна $0,53 \pm 0,07$ Ом·мм.

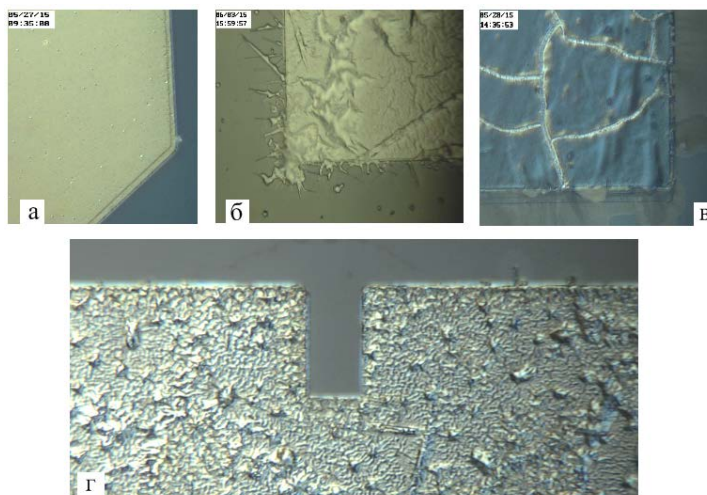


Рис. 5. Внешний вид омических контактов (x50) до и после вжигания при $T=850^{\circ}\text{C}$ 40 с использованием капсулирования нитридом кремния: а) исходный образец до быстрого термического отжига; б) без капсулирования; в) капсулирование 100 нм; г) капсулирование 30 нм.

Формирование затвора транзистора

В ходе эксперимента по формированию затвора транзистора были получены результаты, приведённые в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики транзистора при различной обработке поверхности полупроводника AlGaIn.

	без пассивации				пассивация 30 нм. Si ₃ N ₄			
	HCl	BCl ₃	Рецесс 4 нм	Рецесс 8 нм	HCl	BCl ₃	Рецесс 4 нм	Рецесс 8 нм
J, А/мм	1	0,7	0,58	0,51	0,95	0,8	0,56	0,5
S, мСм/мм	200	160	180	170	180	180	170	170
U _{пр} , В	100	100	110	112	92	90	100	102

Плотность тока насыщения, как и крутизна, максимальны при жидкостной обработке, а при плазменной обработке токи насыщения уменьшаются из-за присутствия радиационных дефектов на поверхности полупроводника. Пассивация затвора приводит к общему снижению токов насыщения и слабому изменению крутизны.

При увеличении глубины рецесса, происходит рост пробивных напряжений, а пассивация приводит к незначительному снижению напряжений пробоя.

Заключение

В результате проделанной работы был сформирован омический контакт к гетероструктуре AlGaIn/GaN с минимальным сопротивлением 0,4 Ом·мм с использованием системы металлизации Ti/Al/Ni/Au (20/140/50/50 нм.) и при температуре вжигания 830°C.

Применение метода капсулирования тонкими слоями диэлектрика, при формировании омических контактов, сохраняет геометрию и морфологию омического контакта. Применение толстых диэлектрических слоёв ведёт к разрушению плёнки диэлектрика при воздействии высокой температуры, что связано с упругими напряжениями в плёнке нитрида кремния. Толщина капсулирующего слоя оказывает не значительное влияние на удельные сопротивления омического контакта.

В результате анализа характеристик транзистора, полученных после формирования затвора, выявлена оптимальная обработка поверхности перед напылением затвора – жидкостная обработка в смеси $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$, в этом случае получены наилучшие характеристики прибора: плотность тока – 1 А/мм, крутизна – 200 мСм/мм, и пробивные напряжения – 100 В.

Библиографический список

1. Волков В.В., Иванова В.П., Кузьмичев Ю.С., Лермонтов С.А., Соловьев Ю.В., Баранов Д.А., Кайдыш А.П., Красовский Д.М., Павлеченко М.В., Петров С.И., Погорельский Ю.В., Соколов И.А., Соколов М.А., Степанов М.В., Чалый В.П. Полевые транзисторы на основе гетероструктур AlGaIn/GaN, полученных методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии, Письма в ЖТФ, 2004, том 30, вып. 9, 12 мая.
2. Van Daele B., Van Tendeloo G., Ruythooren W. // Appl. Phys. Lett. 2005. V.87. P.061905.
3. D. Buttari, A. Chini, G. Meneghesso, E. Zanoni, Systematic Characterization of Cl_2 Reactive Ion Etching for Improved Ohmics in AlGaIn/GaN HEMTs, IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 23, NO. 2, FEBRUARY 2002.
4. Ting-En Hsieh, Edward Yi Chang, Fellow, IEEE, Yi-Zuo Song, Yueh-Chin Lin, Gate Recessed Quasi-Normally OFF Al₂O₃/AlGaIn/GaN MIS-HEMT With Low Threshold Voltage Hysteresis Using PEALD AlN Interfacial Passivation Layer, IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 35, NO. 7, JULY 2014.