

Транзистор на основе гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN с использованием технологии несплавных омических контактов

И.А.Рогоачёв¹, О.И. Мешков¹, А.Ф. Цацульников², В.В. Лундин², Е.Е. Заварин², Д.А. Вакина¹, Д.А. Лаврентьев¹, А.С. Курочка¹, А.С. Максимов¹, Р.Г. Белов¹, В.А. Половинкина¹

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина»

²НТЦ микроэлектроники РАН

Аннотация: В докладе описывается технология создания полевого транзистора на основе AlGaN/GaN структур на сапфировых подложках с использованием селективно-выращенных невжигаемых омических контактов. Проведено сравнение различных конструкций селективно-выращенных контактов и выбрана оптимальная. В результате работы был получен транзистор с длиной затвора 1 мкм, с выходной удельной мощностью 3,25 Вт/мм, КПД 47 %, коэффициентом усиления 11 дБ на частоте 3 ГГц

Ключевые слова: AlGaN/GaN, селективный рост, несплавные омические контакты

1. Введение

На современном рынке мощной СВЧ электроники нитрид галлия уже занял прочные позиции и нашел своё применение в целом ряде отраслей, в производстве спутниковых систем связи, радиолокационных станций, беспроводной электроники и т.д., вытесняет аналогичные приборы, созданные на основе кремния и арсенида галлия [1, 2]. Основным элементом электронных схем при этом является транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT).

Основное преимущество нитрида галлия перед остальными распространёнными материалами электроники – большая ширина запрещённой зоны – 3.4 эВ против 1.1 эВ у кремния и 1.4 эВ у арсенида галлия. Это означает, что GaN-транзисторы потенциально могут работать при более высоких температурах (в теории до 500°С, на практике показана работоспособность при 150-200°С). Напряженность электрического поля пробоя у GaN – 3.3·10⁶ В/см – это в 11 раз больше, чем у кремния. Высокая плотность носителей заряда в HEMT обеспечивает большие плотности тока, что в сочетании с высоким напряжением пробоя и высокой теплопроводностью позволяет достичь высокой плотности мощности. Наконец, большая энергия связи атомов галлия и азота существенно повышает стойкость к ионизирующему излучению.

На рисунке 1 приведена диаграмма ключевых характеристик СВЧ прибора: электрическая прочность, рабочая температура, плотность тока, скорость переключения и сопротивление. Видно, что нитрид галлия выигрывает у традиционных материалов по всем основным характеристикам.

Одной из сложностей создания транзистора на гетероструктурах AlGaN/GaN является создание качественного омического контакта. Традиционный метод формирования контактов [4] подразумевает использование высокотемпературного (800-950°С) быстрого отжига (RTA). Данная процедура приводит к проблемам совмещения топологии различных слоёв, усложнению технологии, ухудшению геометрии омических контактов и меток. Этим проблем можно избежать при использовании невжигаемых контактов к сильнолегированным областям GaN. Одним из методов формирования последних является селективное выращивание сильнолегированного материала в подконтактных областях. С одной стороны, это удлиняет технологический маршрут, в который вводится несколько дополнительных

операций. С другой стороны, повышается качество омических контактов. Отсутствие высокотемпературного быстрого термического отжига гарантирует сохранение морфологии и геометрии омического контакта, что обеспечивает повышение процента выхода годных приборов на пластине и упрощение последующих процессов фото и электронной литографии.



Рисунок 1. Сравнение предельных характеристик приборов на основе нитрида галлия, кремния и арсенида галлия [3]

Данная работа посвящена выбору оптимального варианта конструкции селективно-выращиваемых подконтактных областей и созданию транзисторов на основе этой технологии.

2. Экспериментальная часть

Для разработки технологии были использованы эпитаксиальные гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN на сапфировых подложках диаметром 2 дюйма и 100 мм. Структуры имели подвижность электронов в канале $\sim 1600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, концентрацию двумерного электронного газа (ДЭГ) $1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и слоевое сопротивление 320 Ом/кв . Детали технологии описаны в [5].

На первом этапе проводился выбор дизайна селективно-выращенных подконтактных областей. В качестве сильнолегированного материала сравнивались GaN и AlGaN [6]. Селективный рост сильно легированных кремнием ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) слоев производился в окнах, сформированных в слое Si_3N_4 непосредственно на поверхности исходной эпитаксиальной пластины или с предварительным затравом на глубину 100 нм (больше расстояния от канала до поверхности). Толщина селективно выращивавшегося слоя составляла $\sim 100 \text{ нм}$, и для уменьшения высоты рельефа толщина Si_3N_4 составляла 5 и 100 нм, соответственно (Рис. 2).

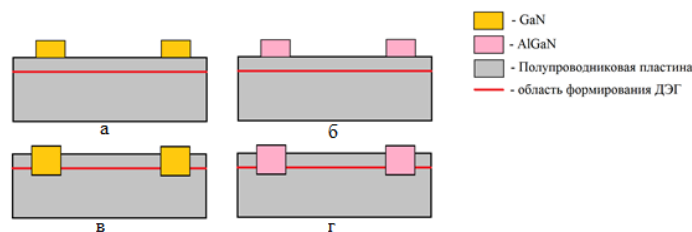


Рисунок 2. Схема вариантов селективного роста сильнолегированных эпитаксиальных структур: а – селективный рост GaN без затравы (Si_3N_4 – 100 н.); б - селективный рост AlGaN без затравы (Si_3N_4 – 100 н.); в - селективный рост GaN с затравом на 100 нм. (Si_3N_4 – 5 н.); г - селективный рост AlGaN с затравом на 100 нм. (Si_3N_4 – 5 н.)

Как планарные структуры, так и подконтактные области выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) в НТЦ микроэлектроники РАН на установке Dragon-125. Травление контактного и активного слоёв нитрида галлия проводилось через фоторезистивную маску SPR-700 и защитную маску Si_3N_4 в индуктивно-связанной плазме в смеси газов BCl_3/Cl_2 в течение 95 секунд на установке «Corgial 200IL» на глубину 100 нм.

При селективном росте эпитаксиальных структур методом ГФЭ МОС, в окнах малой площади, разделенных широкими маскирующими полями, из-за большого притока материала со стороны маскированных полей возникает большое количество дефектов на поверхности сильнолегированных слоёв, что плохо сказывается на параметрах готового прибора. В случае роста на больших площадях, подобные дефекты отсутствуют. Поэтому, традиционная топология роста селективного эпитаксиального роста была оптимизирована с целью уменьшения количества дефектов поверхности роста: селективный рост эпитаксиальных структур проводился по всей поверхности пластины, за исключением областей формирования затвора (2×125 мкм) (Рис. 3).

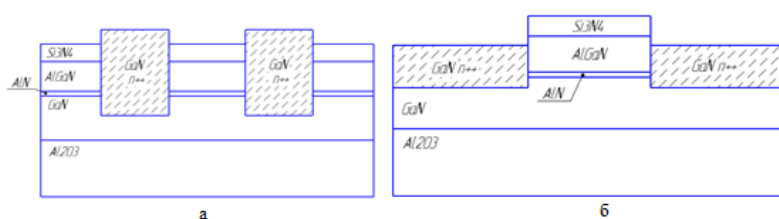


Рисунок 3. Схема селективного роста легированных эпитаксиальных структур GaN: а – традиционная топология; б – оптимизированная топология

Далее, при создании приборов осуществлялась меза-изоляция плазмохимическим травлением в индуктивно-связанной плазме в смеси газов $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$. Металлизация для формирования омических контактов использовалась традиционная – $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$, нанесённая методом вакуумно-термического испарения. Затвор формировали при помощи фотолитографии (длина затвора 1 мкм), с последующим напылением Ni/Au . Верхняя металлизация была создана посредством применения воздушных мостов.

3. Результаты эксперимента

На первом этапе работы было проведено исследование по выбору материала для селективного роста (GaN или AlGaIn) и определено влияние протравы слоя полупроводника в областях селективного роста эпитаксиальных структур.

В результате экспериментов по формированию невжигаемых омических контактов были получены результаты, показанные на рисунке 4.

Анализ результатов эксперимента показал, что минимальное удельное сопротивление омических контактов получается при селективном эпитаксиальном росте сильнолегированного нитрида галлия в областях, вытравленных (с рецессом) ниже уровня формирования двумерного электронного газа. Остальные 3 варианта показали существенно худшие результаты.

На втором этапе исследования была применена оптимизированная топология селективного роста эпитаксиальных слоёв нитрида галлия с углублениями (рис. 4), был сформирован затвор и воздушные мосты, а затем измерены электрические параметры прибора.

После формирования затвора длиной 1 мкм и шириной 125 мкм на тестовых транзисторах были получены характеристики, приведенные в табл. 1.

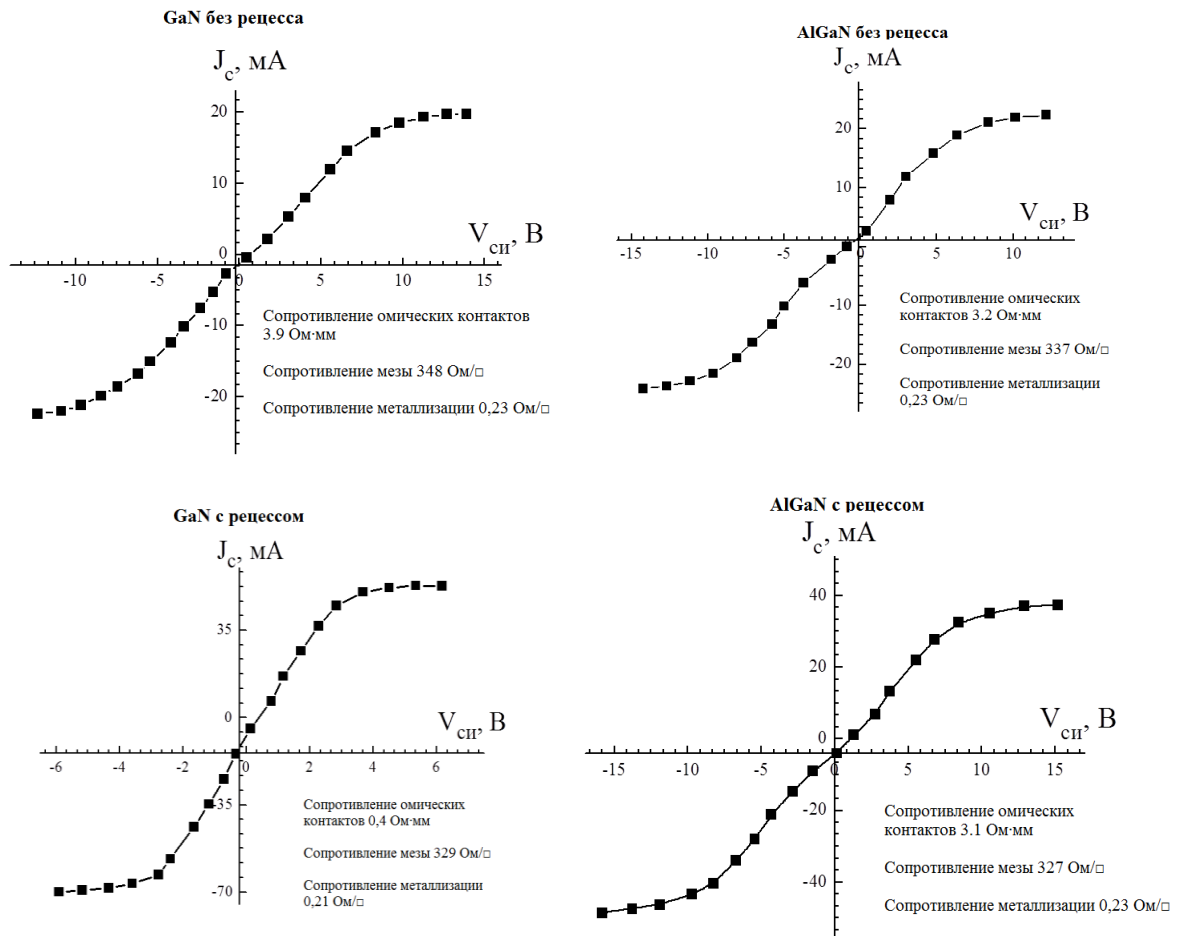


Рисунок 4. ВАХ омических контактов для различных вариантов селективного роста

Заключительным этапом по формированию транзистора была его термическая обработка (отжиг).

Было замечено, что отжиг приводит к незначительному росту плотности тока насыщения до значения 0,45 А/мм и крутизны транзистора до 157 мСм/мм, увеличивает потенциальный барьер контакта металл/полупроводник до 1 В, а также приводит к уменьшению токов утечки до уровня менее 0,01 мА/мм.

Таблица 1. Характеристики транзистора

До термического отжига затворов	После термического отжига
<p>Плотность насыщенного тока – 0,35 А/мм. Крутизна ВАХ – 120 мСм/мм. Напряжение отсечки – 4В.</p>	<p>Плотность насыщенного тока – 0,33 А/мм. Крутизна ВАХ – 125 мСм/мм. Напряжение отсечки – 4В. Барьер – 0,7 В (чёткий). Токи утечки – 30 мкА при напряжении 16 В ($U_{из} = U_{зс}$).</p>
<p>Барьер – 0,7 В (не чёткий). Токи утечки – более 50 мкА при напряжении 16 В ($U_{из} = U_{зс}$).</p>	

Далее, были сформированы мощные транзисторы с воздушными мостами (Рис. 5) и измерены их характеристики.

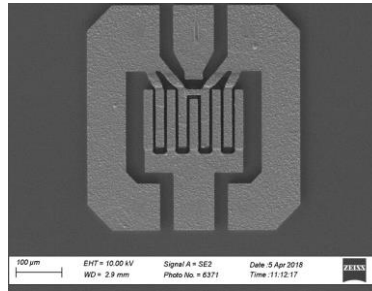


Рисунок 5. Фотография воздушных мостов, полученная с помощью электронного микроскопа Merlin

На рисунке 6 для транзисторов с периферией 1 мм приведены зависимости выходной мощности, КПД и коэффициента усиления от входной мощности на частотах 3 и 5 ГГц. Результаты LOAD-PULL измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2. Измерения LOAD-PULL

Режим	P _{out} max, mW	P _{in} , dbm	PAE, %	p.gain, dB
-2.9_12V_3G	989,9	21,66	1,63	8,292
-2.9_18V_3G	1558	23,35	3,59	8,58
-2.9_20V_3G	1943	24,28	4,59	8,605
-2.9_22V_3G	1943	24,28	4,59	8,605
-2.9_24V_3G	2106	24,22	5,45	9,013
-2.9_28V_3G	2416	25,07	45,56	8,759
-2.9_30V_3G	2537	25,1	45,81	8,947
-2.9_32V_3G	2661	25,74	43,57	8,515
-2.9_40V_3G	3253	24,39	47,73	10,74
-2.9_40V_5G	2911	26,6	35,8	8,038

P_{in} – мощность, поглощенная образцом. $P_{in} = \frac{1}{2} \cdot (|a_1|^2 - |b_1|^2)$, где a и b - падающие и отраженные волны на входе (a_1 , b_1), измеряемого образца;

P_{out} – выходная мощность, поглощенная нагрузкой с импедансом, установленным трансформатором импеданса на выходе. $P_{out} = \frac{1}{2} \cdot (|b_2|^2 - |a_2|^2)$, где a и b - падающие и отраженные волны на выходе (a_2 , b_2), измеряемого образца;

PAE – коэффициент полезного действия по добавленной мощности. $PAE = (P_{out} - P_{in}) / P_{dc}$; P_{dc} – мощность, потребляемая от источника питания. $P_{dc} = V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2$, где V_2 , I_2 - напряжение и ток положительной полярности, а V_1 , I_1 - отрицательной полярности;

Operating Gain – функциональный коэффициент усиления. $GainP = P_{out} / P_{in}$.

Как видно, максимальная мощность на частоте 3 ГГц составила 3,25 Вт при КПД 48%, коэффициент усиления при этом более 10 дБ. На частоте 5 ГГц эти параметры составили 2.9 Вт, 36% и 8 дБ, соответственно.

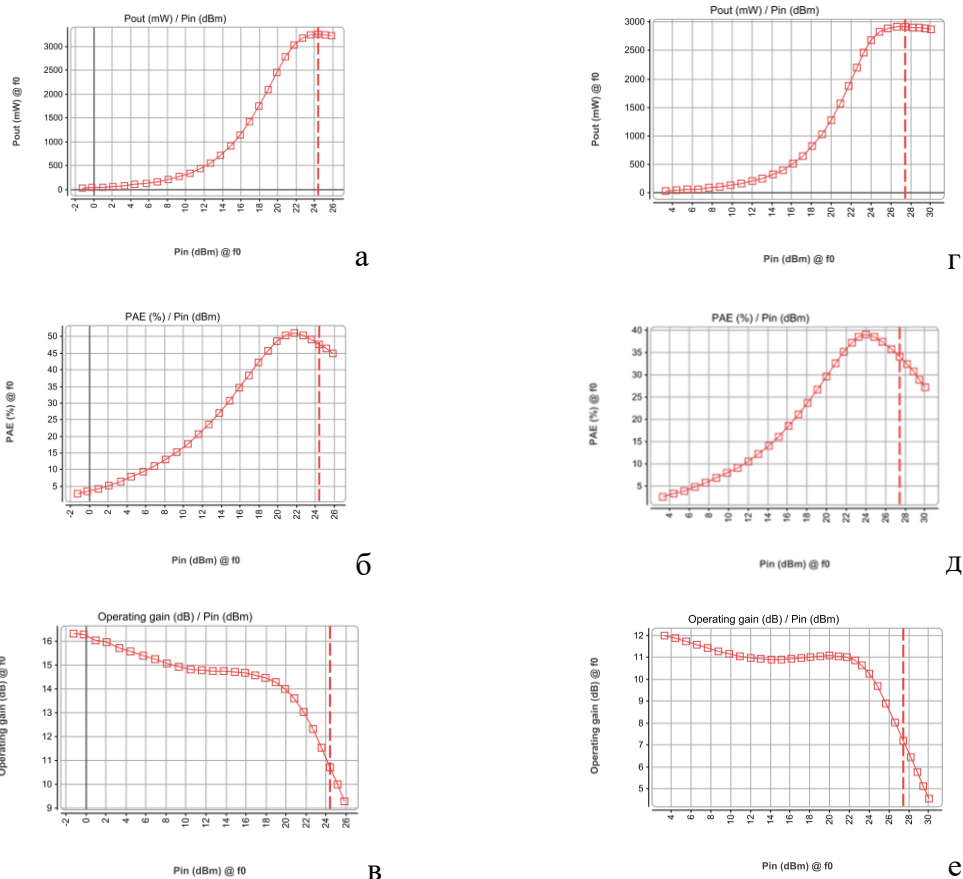


Рисунок 6. Зависимость выходной мощности (а, г), КПД (б, д) и коэффициента усиления (в, е) от входной мощности. 3 ГГц – а-в. 5 ГГц – г-е

4. Заключение

В результате работы был создана технология изготовления транзистора с использованием сильно легированных селективно-выращенных слоев и нежвигаемых омических контактов. Сформированы транзисторы с длиной затвора 1 мкм. Получены значения выходной удельной мощности 3,25 и 2,9 Вт/мм на частотах 3 ГГц и 5 ГГц при напряжении питания 40 В.

Список литературы

1. И. Викулов, Технологическая база GaN СВЧ-микроэлектроники: компании, процессы, возможности, Электроника: наука, технология, бизнес, №1 (00161) 2017, с. 106-115.
2. М. В. Кулиев, Обзор современных GaN транзисторов и направления развития, Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 2 (245) 2017, с. 18-28.
3. Web-портал для разработчиков электроники. Terra Электроника: <https://www.terraelectronica.ru/news/45> (дата обращения: 20.04.2018).
4. Van Daele, B. The role of Al on ohmic contact formation on n-type GaN and AlGaIn/GaN / B. Van Daele, G. Van Tendeloo, W. Ruythooren // Appl. Phys. Lett. – 2005. – V. 87. – p. 061905-1 – 061905-3.
5. А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, М.А. Яговкина, А.В. Сахаров, С.О. Усов, В.Е. Земляков, В.И. Егоркин, К.А. Булашевич, С.Ю. Карпов, В.М. Устинов - Физика и техника полупроводников, 2016, том 50, вып. 10 1401-1407.
6. В.В.Лундин, Е.Е.Заварин, М.Г.Попов, С.И.Трошков, А.В.Сахаров, И.П.Смирнова, М.М.Кулагина, В.Ю.Давыдов, А.Н.Смирнов, А.Ф.Цацульников ПЖТФ, 2015, 41(20), 74-81.