

Технология СВЧ транзисторов на основе InAlN/GaN и AlGaN/GaN гетероструктур

Л.Э. Великовский¹, П.Е. Сим¹, О.И. Демченко¹, Н.Е. Курбанова¹ А.В. Сахаров^{2,4}, В.В. Лундин²,
Е.Е. Заварин², Д.А. Закгейм², А.Ф.Цацульников⁴, Д.С. Артеев², М.А. Яговкина²

¹Томский государственный университет

²ФТИ им. Иоффе

³АО «НПФ «Микран»

⁴НТЦ Микроэлектроники РАН

Аннотация: в работе исследовалась технология СВЧ транзисторов на основе InAlN/GaN и AlGaN/GaN гетероструктур. Измерялись импульсные вольтамперные характеристики для различных конструкций буферных слоев транзисторов. Проведено сравнение СВЧ характеристик транзисторов на основе InAlN/GaN и AlGaN/GaN.

Ключевые слова: нитрид галлия, СВЧ транзисторы

1. Введение

Транзисторы на основе нитрида галлия обладают потенциалом для успешного применения в технологии усилительных СВЧ МИС в широком диапазоне частот. Для разработки технологии нитрид-галлиевых транзисторов и МИС для частот выше 30 ГГц необходимо использование ряда технологических и конструктивных решений, позволяющих компенсировать более низкие, по сравнению с приборами на основе GaAs, подвижности электронов в двумерном электронном газе канала транзистора. Разработанные к настоящему времени ведущими компаниями технологии используют затворы длиной 60-150 нм, несплавные омические контакты, гетероструктуры на основе InAlN и InAlGaN, пропорциональное уменьшение основных размеров транзисторов [1-3].

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Технологическая линия производства GaAs СВЧ МИС АО «НПФ «Микран» была использована для разработки и исследования AlGaN/GaN и InAlN/GaN транзисторов, предназначенных диапазона 30-40 ГГц.

Гетероструктуры AlGaN/GaN и InAlN/GaN выращивались методом MOVPE на подложках карбида кремния диаметром 100 мм и включали в себя изолирующий буферный слой, слой AlN толщиной 1 нм, слои AlGaN или InAlN, и in-situ SiN толщиной 5 нм. Межприборная изоляция формировалась с помощью ионной имплантации. Сплавные омические контакты формировались с использованием Ti/Al/Mo/Au металлизации. Г-образные затворы СВЧ транзисторов длиной ножки 0,1 и 0,15 мкм изготавливались с помощью электронно-лучевой литографии с последующим плазменным травлением щели в SiN, оптической литографии верхней части затвора с последующим напылением Ni/Pt/Au металлизации.

Для характеристики параметров полученных транзисторов использовались импульсные измерения ВАХ, измерения S параметров и loadpull измерения.

Разработанная технология низкоомных ($R_c \leq 0,25$ Ом·мм) омических контактов позволяет за счет низкой толщины металлов (0,12 мкм), и низкой шероховатости поверхности ($RMS \approx 14$ нм) уменьшать расстояния в транзисторе, приближая затвор к истоку и снижать до $1,5 \div 2$ мкм расстояние исток-сток.

Необходимость использования короткоканальных затворов в выбранном СВЧ диапазоне налагает более жесткие требования на токи утечки и пробоя в буферных слоях прибора. Для достижения максимального напряжения пробоя в транзисторе при минимальном эффекте коллапса тока проводилась оптимизация конструкции буферного слоя и сравнение параметров транзисторов с нелегированным, легированным железом и легированным углеродом буферным слоем. Минимальный коллапс тока наблюдался при легировании железом. Измерения ВАХ проводились при длительности импульса 250 нс, для оценки сравнивались характеристики $I_d(V_d)$ для $V_g=0$, измеренные при различных точках покоя (рисунок 1).

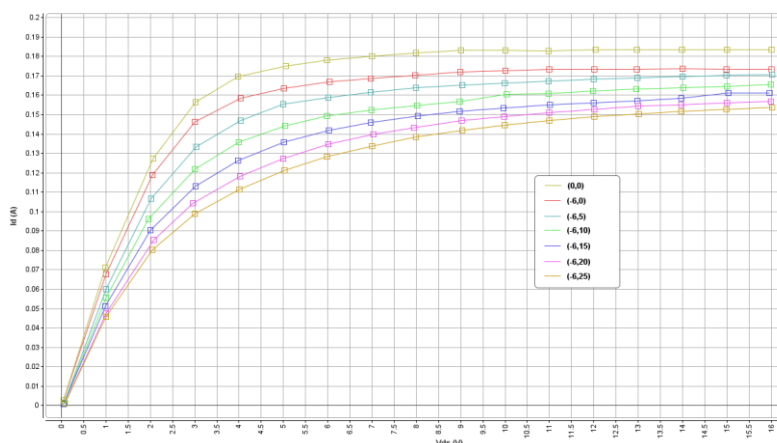


Рисунок 1. Сравнение характеристик $I_d(V_d)$ при $V_g=0$ в AlGaIn/GaN HEMT с Fe-легированным буферным слоем при различных напряжениях в точках покоя ($V_g=0$ В, $V_d=0$ В), ($V_g=-6$ В, $V_d=5\div 25$ В). Длина импульса 250 нс.

Уменьшение длины затвора без пропорционального уменьшения толщины широкозонного слоя AlGaIn в транзисторе может приводить к значительному влиянию короткоканального эффекта на характеристики транзистора. Использование гетероструктур с на основе InAlN позволяет уменьшать толщину широкозонного слоя без уменьшения максимального тока в транзисторе [3]. Более того, за счет большего, чем в AlGaIn/GaN, разрыва зоны проводимости и плотности поляризационных зарядов спонтанной поляризации InAlN/GaN гетероструктуры позволяют увеличить до 2-3 А/мм плотность тока в транзисторе. Благодаря этому можно компенсировать снижение рабочего напряжения в короткоканальных транзисторах с тонким барьерным слоем и получить в миллиметровом диапазоне длин волн высокую мощность и усиление. InAlN является наименее изученным среди твердых растворов, что связано со сложностью его эпитаксии (условия роста Al-содержащих и In-содержащих слоев отличаются – оптимальные температуры для InN~600°C, а для AlN~1200°C). Послойный анализ состава образцов InAlN/AlN/GaN методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, приведенный на рисунке 2, показал, что слой InAlN однороден по составу индия на всей толщине, а содержание индия соответствует заданному (12%).

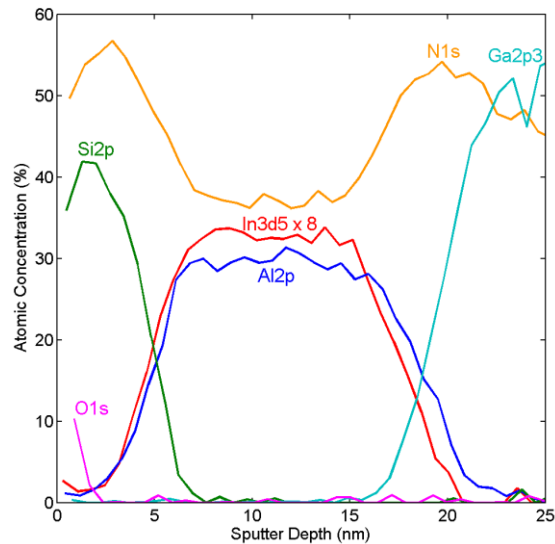


Рисунок 2 Профиль концентрации элементов, полученный при последовательном удалении слоев с поверхности образца с InAlN/GaN гетероструктурой. Показанные на графике значения концентрации In увеличены в 8 раз.

Исследование влияния мольной доли InAlN на электрофизические параметры двумерного электронного газа показало, что при 13÷15% In в InAlN слоевая проводимость имеет максимум. Было обнаружено значительное влияние величины потока триметилндия при росте InAlN на явление коллапса тока стока, что можно связать с изменением спектра и концентрации глубоких центров в слое InAlN и на поверхности. При использовании тонкого (5÷7 нм) барьерного слоя InAlN в сочетании с тонкой вставкой AlN над каналом подвижность и концентрация электронов находятся в диапазоне 1000÷1200 см²/В·с и 2,5÷3,3 см⁻³, соответственно. Изготовленные на таких гетероструктурах НЕМТ с L_g=0,12 мкм имеют ток I_{dmax} более 1,4 А/мм, g_m ≈ 600 мСм/мм при напряжении отсечки V_{th} ≈ -1,5 В.

Применение разработанных для AlGaN/GaN сплавных омических контактов на основе Ti/Al/Mo/Au для формирования контактов к InAlN/GaN гетероструктурам выявило эффект деградации электрофизических параметров при нагреве до 825°C и выше (рисунок 3).

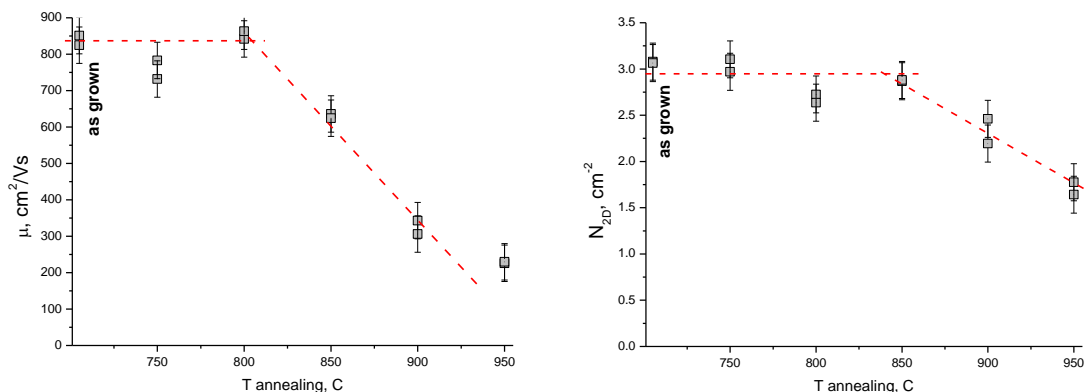


Рисунок 3 Зависимости концентрации и подвижности носителей в канале от температуры отжига (измерены при комнатной температуре). Время отжига составляло 10 мин.

Сравнение малосигнальных СВЧ характеристик InAlN/GaN и AlGaN/GaN НЕМТ с затвором длиной 0,1 мкм, приведенное на рисунке 4, показывает, что, при одинаковых режимах работы по току и напряжению AlGaN/GaN транзисторы обладают более высоким усилением по мощности.

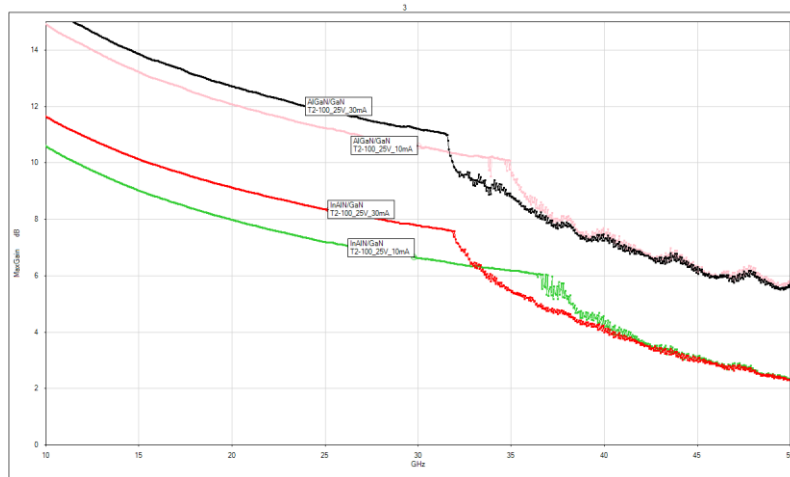


Рисунок 4 Сравнение СВЧ характеристик (MSG/MAG) InAlN/GaN и AlGaIn/GaN HEMT с $L_g=0,1\text{мкм}$.

Проведенные на частоте 17 ГГц импульсные измерения транзисторов на пластине с СВЧ тюнерами импеданса показали, что за счет большей плотности тока InAlN/GaN транзисторы уже при напряжении питания 15В имеют удельную выходную мощность $3.5\div 4$ Вт/мм, превосходя типичные показатели для AlGaIn/GaN транзисторов. Для изготовленных транзисторов разработаны линейные и нелинейные СВЧ модели.

3. Заключение

Полученные в результате исследований результаты показывают высокий потенциал InAlN/GaN, наряду с AlGaIn/GaN гетероструктурами, для применения в СВЧ транзисторах, предназначенных для работы на частотах выше 30ГГц. Использование низкоомных сплавных контактов в сочетании с $0,1\text{мкм}$ затвором и оптимизированной конструкцией буферного слоя, позволяет достигать требуемых для работы в выбранных частотных диапазонах высоких СВЧ параметров.

Повышение усиления InAlN/GaN транзисторов до уровня AlGaIn/GaN аналогов потребует уменьшения расстояния исток-сток, снижения сопротивления омических контактов и оптимизации гетероструктуры. При этом возможно будет реализовать потенциал InAlN/GaN гетероструктуры в достижении высоких удельных значений выходной мощности как в диапазоне 30-40 ГГц, так и в более высоких диапазонах частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 14.578.21.0240 от 26.09.17, уникальный идентификатор работ (проекта) 0000000007518PQK0002.

Список литературы

1. Rocchi, M. 100nm and 60nm GaN/Si MMICs for 5G Mobile Telecommunications / European Microwave Week (2017)
2. GaN on SiC. 15 years of reliability and producibility / Qorvo webinar (2015)
3. Fujitsu Achieves World's Highest Output Density with Power Amplifier for W-Band GaN Transmitters, Press release, Fujitsu Laboratories Ltd. (2017), <https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2017/0724-01.html>
4. H. Wang et al, Phys. Status Solidi C **7**, 2440 (2010)