

Электроника - 2015

Международная научно-техническая конференция

(Зеленоград, 19 - 20 ноября 2015 г.)

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Э45 Электроника - 2015. Международная научно-техническая конференция: тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2015. - 140 с.

ISBN 978-5-7256-0792-5

В материалах конференции представлены результаты научных исследований по следующим направлениям: «Функциональные материалы и структуры электроники», «Электронная компонентная база: проектирование, моделирование, технология», «Микро- и наносистемная техника», «Радиоэлектронные устройства и системы», «Биомедицинская инженерия».

Программный комитет конференции

Ю.В. Гуляев, Г.Я. Красников, Ю.А. Чаплыгин - сопредседатели;
Ж.И. Алферов, В.А. Бархоткин, В.А. Беспалов, А.С. Бугаев, В.А. Быков,
В.Д. Вернер, А.А. Горбачевич, А.В. Зверев, И.А. Каляев, В.А. Лабунов,
П.П. Мальцев, В.Ш. Меликян, А.А. Орликовский, В.Я. Панченко, К.О. Петросянц,
А.Н. Сауров, А.С. Сигов, А.Л. Стемповский, Р.А. Сурис, Ю.М. Таиров,
А.М. Филачев, Е.В. Юртов

Тезисы докладов печатаются в авторской редакции

Разработка технологического маршрута мощного СВЧ транзистора на основе гетероструктуры AlN/GaN

А.А. Зайцев, К.К. Лаврентьев, Р.Ю. Розанов, К.А. Царик

Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»,
e-mail: lavrkk@list.ru

Мощные полупроводниковые приборы на основе нитрида галлия отличаются рядом преимуществ относительно традиционной компонентной базы ввиду превосходных электрофизических характеристик материала (дрейфовая скорость насыщения $2,5 \cdot 10^7$ см/с, напряжение пробоя $3 \cdot 10^6$ В/см, концентрация носителей заряда в канале до $2,3 \cdot 10^{13}$ см⁻², рабочие температуры до 250 °С). Мощные переключатели на основе нитрида галлия обладают большими рабочими частотами и пробивными напряжениями в сравнении с кремниевыми приборами. Однако простых и экономичных методов создания наноразмерных элементов топологии транзисторов до настоящего времени не разработано: либо для проведения литографических операций требуется крайне дорогостоящий шаблон, либо производительность процесса остаётся очень низкой. В настоящей работе был предложен новый технологический маршрут, включающий нанесение многослойных резистов, бесшаблонную фотолитографию знаков совмещения и ионную литографию с применением полимерного резиста.

Транзисторные гетероструктуры были выращены на высокоомных подложках 6H-SiC (0001) и Si (111) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с аммиачным источником атомарного азота на установке STE3N3 компании SemiTeq. Для снижения механической напряженности между подложкой кремния и слоем нитрида галлия использовался слой AlN толщиной 210-350 нм. Для уменьшения плотности ростовых дефектов, которые имеют тенденцию завершаться на гетерограницах, поверхность слоя AlN выращивались апериодическая сверхрешётка AlN/Al_{0,3}Ga_{0,7}N, слой тройного раствора Al_{0,3}Ga_{0,7}N, градиентный слой с плавным уменьшением мольной доли AlN до 0,1 (около 70 нм) и слой тройного раствора Al_{0,1}Ga_{0,9}N. Рост канального слоя (имеющего толщину 1-1,5 мкм для максимального заравнивания ростовых дефектов) происходил при температуре подложки 925 °С, при этом удавалось снизить шероховатость поверхности слоя до 1-3 нм, что очень важно в случае создания гетероструктуры с тонким барьерным слоем для СВЧ приборов. Дальнейшее повышение температуры подложки во время роста GaN нежелательно ввиду разложения материала. Для облегчения управления током стока и увеличения рабочей частоты прибора толщина барьерного слоя AlN снижена до 3 нм. Для облегчения образования омических контактов поверх барьерного слоя создан слой нитрида галлия толщиной 2 нм. С целью возможного снижения влияния поверхностных состояний на электрофизические характеристики создаваемых приборов на выращенных гетероструктурах выполнялась in-situ пассивация поверхности методом выращивания слоя Si₃N₄ толщиной 30-100 нм сразу после окончания роста гетероструктуры. При температуре кремниевого источника 1170 °С скорость роста составила 20 нм/ч. Вжигание омических контактов Ti/Al/Ni/Au (30/150/30/100 нм) осуществлялось при температуре 870 °С в течение 30 с.

Наноразмерные элементы затворов мощного СВЧ транзистора изготовлены методом обратной ионной литографии с применением многослойных резистов. В качестве нижнего слоя использовался резист LOR, а верхнего - чувствительный к ионам резист (ПММА или ЭЛП) толщиной 100 нм. Осаждаемая плазмохимическим методом маска Si_3N_4 может являться промежуточным слоем. Экспонирование ПММА фокусированным ионным пучком (ФИП) с дозой от 8 фКл/мкм² (на 2 порядка меньше стандартных доз экспонирования электронным лучом) позволило создать протяженные структуры шириной от 75 нм. Перенос литографического рисунка на нижние слои резиста осуществлялся методом плазмохимического травления (ПХТ). Исследован также маршрут ионной литографии с применением двухслойного резиста, в котором ПММА или ЭЛП-20 наносится непосредственно на слой резиста LOR, в этом случае после экспонирования и проявления ПММА или ЭЛП сразу выполнялись вскрытие окон в слое LOR методом жидкостного травления (растворитель MF 319), напыление металла и «взрыв» резиста LOR в диметилформамиде. Применение двухслойного резиста вместо трехслойного позволяет существенно упростить технологический маршрут без уменьшения значения максимально возможной толщины металлизации (150-200 нм). Минимальный топологический размер при жидкостном травлении резиста LOR составляет 200 нм, однако при худшем разрешении более быстрый метод позволяет выполнять литографию всех элементов схемы, кроме наиболее точных.

Ввиду невозможности визуализации рельефа непроводящей поверхности методом ионной микроскопии возникает проблема совмещения программного шаблона элементов затвора, которая была решена путём внедрения в технологический процесс изготовления транзистора обратной литографии заземленной непрерывной сетки знаков совмещения на поверхности многослойного резиста. Формирование сетки осуществлялось с помощью бесшаблонной лазерной фотолитографии с применением стандартного фоторезиста ФП-617. Физические и химические воздействия, связанные с литографией металлической сетки, не изменяют свойства нижележащих слоёв резиста. В качестве материала сетки выбран хром, обладающий хорошей адгезией к чувствительному к ионам резисту.

Слоевое сопротивление эпитаксиальной гетероструктуры составило 300 Ом/квadrat, максимальная подвижность электронов в канале - 1600 см²/В·с, концентрация носителей заряда - $1,1 \cdot 10^{13}$ см⁻², сопротивление омических контактов - 0,55 Ом·мм. Испытания изготовленных макетных образцов транзисторов с длиной затвора 200 нм показали плотность тока насыщения, равную 944 мА/мм, и удельную крутизну более 220 мСм/мм. Предельная частота транзистора составила $f_T = 16,5$ ГГц, максимальная частота $f_{\text{max}} = 22,6$ ГГц.

Характеристики разработанных и выращенных гетероструктур и приборов на их основе соответствуют уровню мировой электроники на базе нитридов металлов III группы. Полученные результаты литографии демонстрируют возможность создания различных наноразмерных элементов СВЧ транзисторов и других электронных приборов и схем при помощи экспонирования электронных резистов ионным пучком, в том числе, на поверхности непроводящего слоя.

Работа выполнена при поддержке Гранта Министерства образования и науки Российской Федерации №.14.575.21.0019, уникальный идентификатор Соглашения RFMEFI57514X0019.