

УДК 621.382

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ GAN-ПРИБОРОВ**Литвинова А.В., Ефименко С.А.***Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Сегодня приборы на основе нитрида галлия находят широкое применение в силовой электронике. Рассмотрены базовые технологические процессы создания приборов на основе GaN: начиная с эпитаксии и заканчивая сборкой.

Ключевые слова: нитрид галлия, эпитаксиальное наращивание, изоляция приборов, литография, сборка.

FEATURES OF THE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF GAN DEVICES**Litvinova A.V., Efimenko S.A.***Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Today, devices based on gallium nitride are widely used in power electronics. The basic technological processes of creating devices based on GaN are considered: starting with epitaxy and ending with assembly.

Keywords: gallium nitride, epitaxial buildup, isolation of devices, lithography, assembly.

*Адрес для переписки: Литвинова А.В., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: litvinovanna2410@gmail.com*

GaN-приборы (сокращение от Gallium Nitride) – это полупроводниковые устройства, которые используют соединение галлия с азотом (GaN) в качестве активного материала. Они являются альтернативой традиционным приборам на основе кремния.

По сравнению с традиционной кремниевой технологией при формировании GaN-структур становятся практически недоступными такие базовые технологические операции, как диффузия примесей и окисление. Проблема диффузионного легирования связана с низкими коэффициентами диффузии в GaN таких основных примесей, как алюминий, магний и кремний. Данная проблема также усугубляется максимально допустимой температурой процессов.

Кроме того, имеет ряд ограничений процесс ионного легирования структур, поскольку даже при максимально допустимой температуре процессов 1250 °С не может быть получена полная активация имплантированной примеси.

Таким образом, основным способом формирования легированных GaN-структур является послойное эпитаксиальное наращивание [1].

Эпитаксия. Наибольшее распространение в настоящее время в качестве материала подложек нитридной эпитаксии получили сапфир (Al_2O_3), карбид кремния (SiC) и кремний (Si) [2]. Наилучшей теплопроводностью и наименьшим значением рассогласования постоянных решеток с GaN обладает SiC, однако качественные подложки из этого материала имеют высокую стоимость.

Самыми распространенными способами роста эпитаксиальных структур на основе GaN являются металлоорганическая газофазная эпитаксия (МОГФЭ) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). В основе процесса роста методом МОГФЭ лежит протекание реакции взаимодействия триметил- или триэтилгаллия (алюминия,

индия) с аммиаком. Особенностью роста методом МОГФЭ являются относительно высокое давление в реакторе (до 1 атм.) и высокая температура подложки (1000–1100 °С), которая необходима для эффективного разложения аммиака. Высокое давление газов-прекурсоров в ростовой камере позволяет осуществлять рост на относительно высокой скорости (до нескольких мкм/час). Считается, что высокая температура роста МОГФЭ позволяет добиться высокого структурного качества за счет обеспечения высокой подвижности адатомов на растущей поверхности.

Изоляция приборов. Является одним из первых процессов при формировании структуры, важность которого возрастает с увеличением обратного напряжения. Для решения данной задачи могут использоваться две технологии – травление мезаструктур и ионная имплантация. Мезаструктуры обеспечивают электрическую изоляцию соседних структур на общей подложке. Их травление, как правило, осуществляют методом реактивного ионного травления (РИТ) с индуктивно-связанной плазмой (ИСП) Cl_2 или BCl_3 . Ионная имплантация позволяет осуществить изоляцию методами планарной технологии. С этой целью в поверхность GaN внедряют ионы He^+ , H^+ или N^+ , что увеличивает удельное сопротивление полупроводника до 10^{10} Ом·см. Эффективному восстановлению кристаллической структуры GaN способствует отжиг в газообразном аммиаке или азоте.

Формирование контактов. В качестве омических контактов к n-GaN применяют многослойные структуры типа Ti/Al/Au, Ti/Al/Ni/Au, которые после быстрого термического отжига (БТО) при температуре более 850 °С имеют контактное сопротивление менее 10^{-4} Ом·см². Для контактов к p-GaN целесообразно использовать многослойную структуру типа Ni/Au, которая после БТО при

температуре 600 °С имеет контактное сопротивление менее 10^{-3} Ом·см². Для снижения контактных сопротивлений также можно применять ионную имплантацию примесей в контактные окна перед нанесением металлизации. Для n-GaN это может быть имплантация кремния дозой порядка $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² и энергией 180–250 кэВ с постимплантационной БТО при температурах от 700 до 1100 °С [3]. Подлегирирование контактов для p-GaN менее эффективно по сравнению с n-типом.

Наиболее популярным материалом для затвора Шоттки является многослойная структура типа Ni/Au, а для высокотемпературных операций наилучшим образом подходят многослойные структуры на основе Ig или W.

Литография. Литография является базовым процессом для любого полупроводникового прибора. Фотолитография используется для формирования контактов омических и затворных контактов.

Травление и процессы изготовления канавок. «Мокрое» травление позволяет избежать повреждений структуры полупроводника в процессе. Воспроизводимость «мокрого» травления управляется в основном транспортом реактивов в травителе и очень сильно зависит от геометрии процесса и ряда других факторов. «Сухое» травление GaN-структур является основной технологией формирования рисунка, поскольку «мокрые» процессы травления неэффективны для данных целей.

Формирование поверхности и пассивация прибора. Технология формирования пассивации включает следующие этапы:

- 1) очистка поверхности, включая:
 - удаление материала;
 - модификацию морфологии поверхности;
- 2) предварительная обработка поверхности полупроводника, включая:
 - химическую реакцию на поверхности (например окисление);
 - физическое кондиционирование (например адсорбцию газов);
 - осаждение диэлектрика;
 - формирование многослойной структуры.

Обработка поверхности и условия очистки очень важны в течение всего процесса формирования структуры. Это обусловлено тем, что из-за полярной природы III-N-материалов состояние поверхности эпитаксиальных слоев является критически важным после извлечения из ростового реактора, когда структура подвергается естественному окислению и коррозии в воздушной среде. Для его предотвращения рекомендуется на

поверхности эпитаксиального слоя *in situ* выращивать защитный тонкий слой SiN.

Оптимизированный процесс осаждения пассивации нейтрализует статические и динамические поверхностные состояния, обусловленные обрывными связями на поверхности, адсорбированными ионами и зарядами остаточных материалов, например оксидов. Нитрид кремния является наиболее популярным материалом пассивации для III-N-полупроводников. Типовой эффект от данной пассивации выражается в увеличении выходной мощности, уменьшении эффектов частотной дисперсии и модификации токов утечки, приводящих, как правило, к снижению напряжения пробоя. В дальнейшем эти эффекты приводят к улучшению долговечности приборов. Оксидная пассивация на основе SiO₂ может служить альтернативой нитриду. Нанесение SiO₂ проводят плазмохимическим осаждением при температуре 150 °С в плазме O₂/He с моносиланом.

Сборка. Максимальная рабочая температура кремниевых микросхем и полупроводниковых приборов – 125–150 °С. Элементы на основе карбида кремния SiC и нитрида галлия GaN могут работать при температуре от 200 до 1000 °С. Однако для того, чтобы реализация этих возможностей происходила без ухудшения показателей надежности, необходимо внедрение соответствующих технологий корпусирования модулей, поиск новых интерфейсных материалов, отказ от традиционных технологий пайки кристаллов на плату или в корпус и ультразвуковой сварки выводов кристаллов. Данные процессы во многом определяют физические пределы плотности мощности и температурного диапазона силовых модулей. Одним из возможных кардинальных решений данной проблемы является внедрение компанией SEMIKRON процесса низкотемпературного спекания и разработка SKiN- технологии [1].

Литература

1. Основы силовой электроники / А.И. Белоус [и др.]. – М. : Техносфера, 2019. – 424 с.
2. Литвинова, А.В. Особенности силовых приборов на основе GAN / А.В. Литвинова, С.А. Ефименко // Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», БНТУ. – Минск, 2023. – С. 149–150.
3. Юник, А.Д. Влияние температуры быстрого термического отжига на электрофизические свойства омического контакта металлизации Ti/Al/Ni к гетероструктуре GaN/AlGaIn / А.Д. Юник, Я.А. Соловьёв, Д.В. Жигулин // Доклады БГУИР. – 2022. – № 20(3). – С. 13–19.