

GaN-гетероструктуры на подложках кремния, выращенные методом аммиачной МЛЭ

Е.М. Колобкова, И.С. Езубченко, М.Л. Занавескин

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Аннотация: в данной работе исследовались нитридные гетероструктуры на подложке кремния, сформированные методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксией. Предложен подход для формирования гетероструктур, исключающий влияние остаточной атмосферы аммиака в камере роста и несоответствия коэффициентов теплового расширения нитрида галлия и кремния. Синтезированы нитридные гетероструктуры приборного качества со слоевым сопротивлением 312 Ом/□, концентрацией основных носителей заряда $1,27 \cdot 10^{13}$ см⁻² и подвижностью 1575 см²/(В·с).

Ключевые слова: нитрид галлия, гетероструктура, кремний

1. Введение

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на базе нитрида галлия (GaN) все ещё остаются объектом исследований и разработок мировых лабораторий из-за заинтересованности в усовершенствовании монолитных интегральных схем (МИС) для сверхвысокочастотных технологий (СВЧ).

В технологии синтеза GaN-гетероструктур в качестве подложек служат те материалы, которые ближе всего к нитридам по параметрам решетки [1]. Среди всех материалов монокристаллический кремний (Si) выделяется тем, что он дешевле и доступнее GaN, легче поддается механической обработке, чем карбид кремния (SiC), и обладает более высокой теплопроводностью, чем у сапфира [2]. С точки зрения крупных промышленных производств, преимущество кремния лежит в доступности больших подложек кремния, а также возможности адаптации нитридных технологий для существующих кремниевых фабрик.

Основная проблема синтеза GaN-гетероструктур на Si заключается в большом несоответствии параметров решёток и коэффициентов теплового расширения (КТР) этих материалов. Различие КТР приводит к растрескиванию плёнки GaN при охлаждении с температуры роста.

В установках аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) из-за особенностей роста нитридных гетероструктур на кремнии необходимо сформировать кристаллический нитрид кремния (β -Si₃N₄) на поверхности подложки [3]. В аммиачной МЛЭ этот процесс трудно контролировать из-за остаточной атмосферы аммиака в ростовой камере. Поэтому технология синтеза нитридных гетероструктур на кремнии значительно осложнена по сравнению с GaN на сапфире и GaN на SiC.

Наша работа заключалась в разработке методики роста AlGaN/GaN гетероструктуры на подложках кремния.

2. Детали эксперимента и экспериментальные данные

Гетероструктуры были выращены в установке аммиачной МЛЭ SemiTEQ STE3N. Для получения качественных нитридных гетероструктур была разработана методика нитридации кремния, и определены условия контролируемого формирования β -Si₃N₄ при парциальных давлениях аммиака $3 \cdot 10^{-5}$ Торр. Экспериментально установлена архитектура с тремя последовательно выращенными вставками состава

AlN - Al_xGa_{1-x}N - Al_{0,11}Ga_{0,89}N, где мольная доля алюминия в слое переменного состава менялась от 42,7 до 36,5 мол.% Al. Такая вставка обеспечила накопление необходимого компенсирующего сжимающего напряжения, в результате чего гетероструктура на выходе не имела трещин и обладала двумерным электронным газом (2DEG) [4]. Результаты измерений электрических характеристик 2DEG представлены в таблице 1, из которых видно, что полученная гетероструктура обладает хорошим кристаллическим качеством, что и обеспечивает хорошие параметры 2DEG.

Таблица 1. Параметры 2DEG гетероструктуры

Слоевое сопротивление R _s , Ом/□	Концентрация основных носителей заряда n _s , см ⁻²	Подвижность основных носителей заряда μ, см ² /(В·с)
312	1,27·10 ¹³	1575

3. Заключение

Методом аммиачной МЛЭ выращены нитридные гетероструктуры на подложках кремния. Разработан уникальный подход к формированию кристаллической фазы β-Si₃N₄ в условиях остаточной атмосферы аммиака. Подобрана архитектура с неиспользуемыми ранее в технологии роста на кремнии тремя вставками состава AlN - Al_xGa_{1-x}N - Al_{0,11}Ga_{0,89}N, позволяющими накопить достаточные сжимающие напряжения. Полученные гетероструктуры характеризовались слоевым сопротивлением 312 Ом/□, концентрацией электронов 1,27·10¹³ см⁻² при подвижности 1575 см²/(В·с).

Исследование выполнено при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

Список литературы

1. Ambacher O. Growth and applications of Group III-nitrides. Journal of Physics D: Applied Physics. - 1998. - V. 31. - № 20. - P. 2653.
2. Kaun S.W. et al. Molecular beam epitaxy for high-performance Ga-face GaN electron devices// Semiconductor Science and Technology. - 2013. - V. 28. - P. 074001
3. Le Louarn A. et al. AlN buffer layer growth of GaN epitaxy on (111) Si: Al or N first? // Journal of Crystal Growth. - 2009. - V. 311. - № 12. - P. 3278
4. Майборода И. О. и др. Контролируемое образование β-Si₃N₄ в потоке аммиака на подложках кремния, покрытых слоем нативного оксида// Кристаллография. – 2021. – Т. 66. - № 3. - С. 473.