

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДОМ МЛЭ БУФЕРНЫХ СЛОЕВ AlN И AlGaN НА СТРУКТУРНОЕ СОВЕРШЕНСТВО ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

petrov@semiteq.ru

Зайцев С.В., мл. науч. сотр.,
Мамаев В.В.,
Новиков С.А.,
Петров С.И., канд. физ.-мат. наук,
ЗАО "Научное и технологическое оборудование"
Прохоренков Д.С., инженер-исследователь
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Рассмотрены особенности получения гетероструктур AlN/AlGaN методом аммиачной МЛЭ и возможности улучшения структурного совершенства. На первом этапе работы были поставлены цели по выращиванию гетероструктур AlN/AlGaN с различными параметрами ростового процесса, а также исследование плотности дислокаций в полученных гетероструктурах. Показано, что использование экстремально высокотемпературных для МЛЭ буферных слоев (до 1150°C) позволяет кардинально улучшить структурное совершенство и понизить плотность дислокаций в них до значений $2\text{-}4\cdot 10^{10}\text{ см}^{-2}$, $4\text{-}5\cdot 10^9\text{ см}^{-2}$ для слоев AlN и AlGaN с содержанием алюминия до 50%, соответственно. Таким образом, цели первого этапа полностью выполнены. Основной целью продолжения работы является снижение плотности дислокаций в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x>50\%$) прозрачных в ультрафиолетовом диапазоне до $1\text{-}5\cdot 10^9\text{ см}^{-2}$.

Ключевые слова: нитридные гетероструктуры AlN/AlGaN, оптоэлектронные приборы УФ диапазона, СВЧ транзисторы, плотность дислокаций.

Уникальные свойства нитридов галлия, алюминия, индия и их твердых растворов делают их наиболее подходящими материалами для изготовления транзисторов с высокой подвижностью электронов, сочетающих в себе высокие рабочие частоты и высокие удельные мощности. Особо отмечаются эффекты спонтанной и

пьезоэлектрической поляризации, которые приводят к повышению концентрации двумерного электронного газа. Прямоzonная структура энергетических зон позволяет проектировать и создавать оптоэлектронные приборы, работающие в широком спектральном диапазоне.

Наиболее распространенными методами на сегодняшний день являются: химическое осаждение из газовой фазы (MOCVD), молекулярно-лучевая эпитаксия с плазменной активацией азота (PAMBE) и аммиачная молекулярно-лучевая эпитаксия (NH₃ MBE, аммиачная МЛЭ). Аммиачная МЛЭ объединяет в себе ряд преимуществ MOCVD и PAMBE. Условия высокого вакуума обеспечивают низкую концентрацию примесей, резкие гетерограницы, а также делают возможным использование дифракции быстрых отраженных электронов (RHEED). Использование аммиака в качестве источника азота позволяет проводить ростовые процессы в широком диапазоне параметров, в то время как в PAMBE использование плазменного источника налагает сильные ограничения на потоки металла и температуру подложки. Вместе с тем, температуры роста нитридов при аммиачной эпитаксии оказываются ниже, чем в MOCVD. Как следствие, гетероструктуры имеют плотность проникающих дислокаций порядка 10^{10} на см^{-2} и развитую морфологию рельефа пленок.

При этом поведение дефектной структуры в слоях III-нитридов принципиально отличается от традиционных A3B5, поэтому до сих пор остаются предметом дискуссий вопросы о влиянии структурной разупорядоченности слоев III-нитридов на их электрические и оптические свойства. Этим материалам свойственна более сложная дефектная структура, существование которой предопределяется неравновесными условиями роста в присутствии больших рассогласований параметров решетки с подложкой и необходимостью при этом формирования переходного зародышевого слоя. В результате образуется квазиэпитаксиальный наноматериал, текстурированный протяженными дислокационными и дилатационными границами, с большой плотностью дислокаций и их скоплений, пронизывающих активную область приборов. Это порождает многообразие форм организации наноматериала от плохо сросшихся доменов до практически совершенных эпитаксиальных слоев только со следами границ доменной структуры, но с большими локальными неоднородно распределенными механическими напряжениями и локальными на наноразмерном уровне неоднородностями состава твердых растворов.

Слои AlGaN с высоким содержанием Al подвержены этой проблеме в наибольшей степени. В этом состоит основная причина противоречий в результатах различных авторов, поскольку обычно исследуются слои и структуры, имеющие разные формы организации наноматериала.

От условий формирования зародышевого слоя зависит, какого качества будет сформирована приборная структура, поскольку даже незначительные изменения условий формирования зародышевого слоя приводят не столько к изменению плотности единичных дислокаций, сколько к изменению плотности их скоплений и протяженности дилатационных и дислокационных границ, т.е. к изменению характера организации наноматериала и его дефектной структуры.

На данном этапе были поставлены следующие цели:

- Выращивание методом МЛЭ с использованием аммиака гетероструктур с различными параметрами ростовых процессов. Гетероструктуры должны состоять из высокотемпературного буферного слоя AlN и слоев AlGaN.
- Исследование плотности дислокаций в полученных гетероструктурах.

Для улучшения качества структур предложен способ получения низкодислокационных буферных слоев AlN/сверхрешетка/AlGaN, выращенных при экстремально высоких температурах.

Многослойные гетероструктуры выращивались на подложках Al₂O₃ (0001) в Прикладной лаборатории ЗАО «НТО» на отечественных установках МЛЭ STE3N, разработанными и созданными в ЗАО «НТО» (SemiTEq). Уникальными особенностями данной установки является расширенный диапазон температур подложки и отношений V/III. В частности, благодаря криопанелям увеличенной площади и усиленной системе откачки в ростовой камере обеспечивается вакуум не хуже $5 \cdot 10^{-3}$ Па при увеличении температуры подложки до 970°C при потоке аммиака 400 см³/мин. В результате дополнительной модернизации узла нагрева образца диапазон достижимых температур подложки был увеличен до 1200°C, что позволило заметно улучшить свойства слоев AlN и многослойных гетероструктур AlN/AlGaN.

Выращивание на начальной стадии роста слоев AlN толщиной более 200 нм при температуре 1150°C на подложке, а затем выращивание переходных областей AlGaN, включая сверхрешетки, при температуре 900–920°C привело к улучшению свойств всей структуры. Оптимизация сверхрешетки AlN-AlGaN состояла в подборе параметров (шаг, состав, температура) позволяющих сохранить высокий процент алюминия в твердом растворе, при этом обеспечивающих схлопывание

прорастающих дислокаций путем загиба их на гетерограницах. Итоговая оптимизация позволила выйти на твердый раствор AlGaN с содержанием алюминия 50% при сохранении 2D режима роста.

На рис. 1 представлено изображение гетероструктуры, состоящей из слоев AlN, сверхрешетки AlN-AlGaN, $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ полученное при помощи сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM). При помощи STEM было установлено, что плотность дислокаций находится на уровне $2\text{-}4\cdot 10^{10}\text{ см}^{-2}$, $4\text{-}5\cdot 10^9\text{ см}^{-2}$ для слоев AlN, AlGaN соответственно.

Цели на конец 2015 года:

Снижение плотности дислокаций в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x>50\%$) прозрачных в ультрафиолетовом диапазоне до $1\text{-}5\cdot 10^9\text{ см}^{-2}$.

Анализ информации об особенностях формирования слоев AlGaN с высоким содержанием алюминия. Установление корреляции между степенью упорядоченности решетки и особенностями роста.

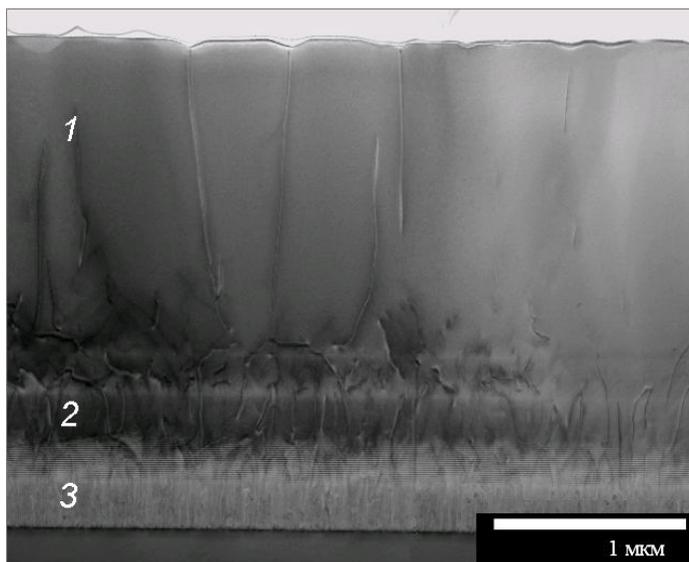


Рисунок 1 – Изображение скола многослойной гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа; указаны слои и полные плотности дислокаций:

1 – AlN; $2\text{-}4\cdot 10^{10}\text{ см}^{-2}$; 2 – SLS; 3 – AlGaN; $4\text{-}5\cdot 10^9\text{ см}^{-2}$

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и
Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08048
«р_офи_м».*