

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Малина Тимура Валерьевича на тему «Эпитаксиальные слои GaN на кремниевых подложках для AlGaIn/GaN гетероструктур с высокой подвижностью электронов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Гетероструктуры на основе широкозонных нитридных материалов находят все большее применение для разработки приборов микроэлектроники нового поколения, в частности – для высокочастотных HEMT и MOSHEMT-транзисторов. Невозможность гомоэпитаксии слоев AlGaIn/GaN тормозит широкое использование этих материалов и заставляет использовать в качестве подложек при эпитаксии слоев AlGaIn/GaN для мощных СВЧ-приборов карбид кремния, а для других типов СВЧ-приборов сапфир и кремний. Разработка технологии, позволяющей получать достаточно качественные эпи-слои AlGaIn/GaN на кремниевых подложках, кажется весьма перспективной для мощных СВЧ-приборов из-за хорошей теплопроводности кремния, кроме того это позволит увеличить диаметр гетероструктур и использовать разработки современной кремниевой технологии при производстве приборов на нитридных структурах. Производство HEMT-транзисторов требует использования гетероструктур с высокой подвижностью носителей заряда в области 2DEG, а как было показано в работе Томских ученых, нано и микрорельеф границы слоев AlGaIn-GaN влияет на процесс рассеяния электронов в канале и как следствие на подвижность носителей. В связи с вышесказанным, актуальность работы, направленной на разработку «физических основ аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии слоев GaN-на-Si, свободных от трещин, для гетероструктур с высокой подвижностью электронов, включающей технологию роста структурно совершенного активного слоя GaN с гладкой морфологией поверхности», не вызывает сомнения, а полученные результаты могут представлять научный и практический интерес.

В процессе работы диссертантом для получения корректных результатов был разработан оригинальный оптический метод контроля температуры на поверхности растущей плёнки путем измерения спектров свечения нагретой подложки. Перед этим было показано, что при привычном методе измерения термпарой измеряемая температура значительно (до 100 °С) отличается от температуры на поверхности пленки,

т.е. истинная температура на поверхности при старом методе измерения практически неизвестна. Измеренные спектры свечения нагретых подложек с дальнейшей аппроксимацией полученного измерения позволили откорректировать и установить влияние истинной температуры процесса на сам процесс роста.

В ходе работы диссертантом была разработана технология роста свободных от трещин слоёв GaN на кремниевых подложках (111) методом NH<sub>3</sub>-МЛЭ. Диссертантом установлено, что наличествуют три основные моды роста слоёв GaN, выращиваемых методом NH<sub>3</sub>-МЛЭ, соответствующие определённым ростовым условиям. Наиболее интересным, на наш взгляд, является то, как экспериментально показано, что нитридизация кремния приводит к увеличению остаточных растягивающих напряжений в зародышевых слоях AlN из-за формирования на границе раздела Al-Si аморфной фазы SiN. Это может влиять на картину распределения напряжений в растущих слоях и на качество самих слоёв.

В заключение (Глава 4) диссертанту с привлечением большого количества методов исследования удалось провести весьма корректно сравнение качества пленок, выращенных с использованием разработанной технологии, но при использовании подложек из двух разных материалов: кремния и сапфира. Показано, что разработанная технология позволяет получать пленки GaN на кремниевых подложках без трещин с морфологией поверхности не хуже, чем на сапфировых подложках (Глава 4, рис.5), т.е. решить поставленную в работе задачу.

Публикации, указанные в автореферате (11 публикаций), достаточно полно отражают содержание работы. Изложение результатов работы в научных публикациях и докладах на конференциях более чем удовлетворяют критериям ВАК.

По автореферату можно высказать следующие замечания:

1. В автореферате практически не указан диаметр используемых кремниевых подложек. Поэтому непонятно, диссертанту удалось получить слои без трещин на всем диаметре пластины или только на кусочках 8x8 и 7x7.

2. Нам кажется, что говорить о сопротивлении получаемых слоев GaN а также о токах утечки вообще некорректно, поскольку неизвестно сопротивление самой кремневой подложки, которая может влиять на электрические параметры растущих слоев. Как эти параметры измерялись, в

диссертации неясно. Обычно для НЕМТ-транзисторов предполагается, что надо использовать в качестве подложек практически беспримесный кремний, при этом полученный зонной плавкой с минимальным содержанием кислорода и углерода, поскольку все примеси могут диффундировать в растущий слой.

3. В работе ничего не сказано о полярности растущей пленки. Инверсионные домены – это локальные дефекты, а как выдерживается полярность - рост пленки в Ga-направлении по всей структуре?

Однако, указанные замечания не снижают общего впечатления о важности работе, проведенной соискателем.

Считаем, что выполненная соискателем диссертационная работа соответствует требованиям п.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного правительством РФ от 24.09. 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Малин Тимур Валерьевич заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности. 1.3.11 – Физика полупроводников.

Отзыв составил:

Начальник лаборатории  
АО «НПП «Пульсар», д.т.н.

Кира Львовна Енишерлова

Дата: 5.03. 2025

Тел: 8(495) 366 54 00, E-mail: [Enisherlova@pulsarnpp.ru](mailto:Enisherlova@pulsarnpp.ru)

Адрес: 105187, Москва, Окружной проезд, д.27. АО «НПП «Пульсар»

Подпись К.Л. Енишерловой удостоверяю:

Заместитель генерального дирек  
АО «НПП «Пульсар», д.т.н.

Колковский

Проставил в совет 19.03.2025  
Осмертин Д.И.