



Минобрнауки России
Институт физики микроструктур РАН
- филиал Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-
Грехова Российской академии наук»
(ИФМ РАН)

Академическая ул., д. 7, д. Афонино, Кстовский р-н,
Нижегородская обл., 603087
почта: ГСП-105, Н.Новгород, 603950

тел.: (831) 417-94-73, факс: (831) 417-94-64
E-mail: director@ipmras.ru; <http://www.ipmras.ru>
ОКПО 04683326, ОГРН 1025203020193
ИНН/КПП 5260003387/525043001

Диссертационный совет 24.2.347.01
при Федеральном государственном
бюджетном образовательном
учреждении высшего образования
«Новосибирский государственный
технический университет»

630073, г. Новосибирск, пр. К.
Маркса, 20, корпус I

На № 130 от 28.03.2025 г.

Отзыв

на автореферат диссертации Малина Тимура Валерьевича «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.

В настоящее время транзисторные структуры типа НЕМТ на основе нитрида галлия являются наиболее перспективными для создания на их основе нового поколения приборов СВЧ и силовой электроники. Преимущества таких структур основаны, главным образом, на уникальном сочетании высокой подвижности и концентрации электронов в канале транзистора. В совокупности с высокими значениями полей пробоя, большой теплопроводностью, химической, радиационной и температурной стойкостью позволяют получать на структурах основе нитрида галлия приборы с характеристиками недоступными для других материальных систем. К сожалению, реализация всего потенциала таких структур затруднена отсутствием «родных», коммерчески доступных подложек для эпитаксии. Среди подложек, используемых для эпитаксии A_3 -нитридов, подложки Si(111) выделяются своей доступностью, высоким кристаллическим качеством, широким размерным рядом, а также хорошо развитой технологией постростовой обработки. Однако, получение высококачественных транзисторных структур на основе GaN на кремниевых подложках сопряжено с рядом проблем. В связи с этим развитие технологии эпитаксии GaN на кремниевых подложках методом NH_3 -MBE является **актуальной** задачей современной физики полупроводников.

Среди наиболее значимых научных результатов, полученных в диссертационной работе, хочется выделить детальное исследование процессов нитридации поверхности Si(111) при различных температурах и потоках аммиака. В работе показана важность получения упорядоченной, кристаллической фазы SiN для роста на кремнии GaN слоёв высокого кристаллического качества, без микротрещин. Не менее важным для снижения растягивающих напряжений и формирования рабочего слоя GaN без микротрещин

является конструкция буферного слоя. В работе предложены технологически простые конструкции буферных слоёв толщиной не более 0.5 мкм, которые при правильно проведённой нитридации приводят к формированию на кремнии высококачественных слоев GaN. В работе определены режимы эпитаксии GaN слоёв, приводящие к их высокому кристаллическому качеству и низкой шероховатости поверхности. Завершённость работе в результате проведённых исследований придаёт демонстрация транзисторной HEMT структуры AlGaIn/GaN, эпитаксиально выращенной на подложке Si(111) с хорошей подвижностью ($\sim 1200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), высокой концентрацией 2D электронов ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$) и низким током утечки.

Подробное описание автором методик проводимых измерений и параметров ростовых процессов не вызывает сомнений в достоверности полученных результатов.

В качестве замечаний к автореферату можно высказать следующие:

- 1) В пункте 4 научной новизны утверждается, что «вне зависимости от остаточных упругих напряжений в эпитаксиальных слоях GaN морфология поверхности слоев определяется исключительно ростовыми условиями». Однако, величина остаточных упругих напряжений в процессе эпитаксии GaN и после остывания структуры различна. На режим эпитаксии влияют первые, а из текста реферата следует, что определялись вторые - уже в выращенной и остывшей структуре. После роста слоя GaN его морфология сформировалась и остаточные упругие напряжения, возникшие в результате остывания никак на неё повлиять не могут (за исключением появления трещин). Исследований упругих напряжений в GaN в процессе его роста в автореферате не упоминается.
- 2) По-видимому, из-за ограничений на объём автореферата часть важных экспериментальных данных, необходимых для использования в практических целях результатами диссертационной работы, опущены. В частности, для Главы 3 не указаны условия формирования зародышевого слоя AlN и буферных слоёв (температуры и потоки).
- 3) Немного удивительными выглядят данные о плотности прорастающих дислокаций в структурах полученных автором (плотность дислокаций для подложки кремния составила $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$, а для подложки сапфира $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$). Эти цифры близки к рекордным даже для структур, полученных методом MOCVD, в то время как данные о подвижности по сравнению с MOCVD структурами заметно уступают, что вызывает сомнения в точности определения плотности прорастающих дислокаций.

Приведенные замечания не имеют принципиального значения и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы. Считаем, что диссертационная работа Малина Тимура Валерьевича «Эпитаксиальные слои GaN на кремниевых подложках для AlGaIn/GaN гетероструктур с высокой подвижностью электронов» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук.

Отзыв составил:

Старший научный сотрудник ИФМ РАН,
к. физ.-мат. н.

Д.Н.Лобанов

Подпись Д.Н. Лобанова
Начальник отдела кадров

Осипенко

Поступил в архив 21.04.2025
Осипенко Д.И.