

## Отзыв

председателя диссертационного совета Филатовой Елены Олеговны на диссертацию **Шапенкова Севастьяна Владимировича** на тему «**Взаимосвязь атомной структуры и люминесцентных свойств протяженных дефектов в нитриде галлия**» представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Нитрид галлия, GaN, - прямозонный полупроводник с кристаллической решеткой вюрцита и шириной запрещенной зоны 3,4 эВ при 300 К, который повсеместно используется в производстве светоизлучающих и силовых электронных приборов. Такие приборы изготавливают на основе гетероэпитаксиальных пленок GaN, выращенных на коммерчески доступных ориентирующих монокристаллических подложках из чужеродных материалов, таких как сапфир или карбид кремния, что приводит к образованию в слоях нитрида галлия дислокаций большой плотности и других протяженных ростовых дефектов. Несмотря на многочисленные исследования, происхождение и механизм влияния указанных дефектов на электронные свойства нитрида галлия во многих случаях остаются однозначно не установленными, так как ростовые дефекты в высокотемпературных процессах получения пленок и создания приборов испытывают различные структурные превращения, активно взаимодействуют с собственными точечными дефектами и примесями. Это касается и так называемых свежевведенных *a*-винтовых дислокаций, для которых был установлен неожиданный факт – различие в спектральном положении и поляризации люминесценции в образцах различного удельного сопротивления. В этом смысле тема кандидатской диссертации Шапенкова С.В., направленная на установление взаимосвязи между локальными особенностями кристаллической структуры протяженных дефектов, возникающих при пластической деформации гексагонального нитрида галлия, и их электронными свойствами представляется **актуальной** как в научном, так и в прикладном аспектах.

Работа представляет собой законченное исследование, в ходе которого реализовано комплексное исследование, базирующееся на применении разработанной Шапенковым С.В. новой методики приготовления образцов тонких фольг исследуемого материала, что обеспечило одновременное проведение исследований методами просвечивающей электронной микроскопии и катодолюминесценции и позволило автору впервые напрямую провести сопоставление атомной структуры ядер дислокаций и спектрального состава излучения.

Важным достоинством работы является детальное исследование видов и структуры протяженных дефектов вблизи отпечатка наноиндентора, подробный анализ видов узлов

пересекающихся дислокаций и выявление большого числа протяженных узлов, состоящих из треугольных сегментов дефектов упаковки типа  $I_2$ , размеры которых весьма переменны. Впервые продемонстрировано, что дефекты упаковки в узлах пересечения винтовых дислокаций являются источником люминесценции, причем люминесценция, связанная с конкретным узлом, определяется его геометрическими параметрами и влиянием остаточных механических напряжений.

На мой взгляд особый интерес представляют следующие результаты:

1. Прямое наблюдение люминесценции на длине волны полосы IRL от отдельных расширенных дислокационных узлов;

2. Для GaN, легированного железом, показаны и подтверждены структурными исследованиями полосы люминесценции совершенных, расщепленных дислокаций и расширенных узлов.

3. Дана численная модель оценки равновесной конфигурации структуры расщепленных дислокаций с учетом кулоновского взаимодействия между разнозаряженными ядрами частичных дислокаций.

В прикладном аспекте следует отметить, что полученные данные о люминесценции дислокаций и протяженных дислокационных узлов в нитриде галлия могут быть использованы в качестве основы неразрушающего метода мониторинга структурного качества этого материала на разных этапах технологического процесса создания элементов электронной техники. Диссертационная работа Шапенкова С.В. решает важные проблемы в понимании этого явления, что может приблизить возможность его эксплуатации.

**Достоверность** результатов диссертации подтверждается использованием современной электронно-микроскопической приборной базы для проведения структурных и люминесцентных исследований, воспроизводимостью полученных экспериментальных данных на различных образцах и использованием хорошо апробированных теоретических подходов при их интерпретации. Основные результаты работы опубликованы и прошли рецензирование в международных научных журналах, что подтверждает достаточную **обоснованность** сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций.

Диссертация построена логично, изложена грамотным языком и хорошо иллюстрирована. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы.

При знакомстве с диссертационной работой возникли следующие вопросы и замечания:

1) В разделе 3.6 предложено качественное объяснение тонкой структуры спектра люминесценции протяженных узлов и представлена диаграмма со схемой

возможных оптических переходов. Однако достаточно ясное описание того, что изображено на этой диаграмме в тексте диссертации отсутствует. Имеющиеся в подписи к рисунку пояснения не отображают его сути.

- 2) На рисунке 4.6 приведены спектрально разрешенные карты катодолюминесценции вблизи укола индентора с нагрузкой 500 мН при трех разных энергиях фотонов, соответствующих излучению расщепленных, совершенных дислокаций и узлов пересечения. Спектральное положение линий DBE и расщепленных узлов IRL оказывается весьма близким; диапазоны этих полос перекрываются. Монохроматическая карта КЛ на рис 4.6b, записанная приблизительно в центре полосы IRL (люминесценция узлов), скорее повторяет карту на длине волны DBE (люминесценция совершенных дислокаций) (рис 4.6c). Обсуждение этого факта в тексте диссертации проведено слишком лаконично для его однозначной интерпретации. Объяснение пространственным расположением источников IRL неубедительно.
- 3) В работе имеется большое число опечаток, орфографических ошибок, повторяющихся слов и неудачных формулировок, которые, однако, не затрудняют чтение.

Сделанные выше замечания не снижают научной ценности работы и не влияют на общее положительное впечатление от диссертационной работы, которая выполнена на высоком современном научно-техническом уровне и содержит ряд новых результатов, существенно расширяющих существующие фундаментальные представления о структуре и электронных свойствах дефектов в полупроводниках. По **актуальности** темы, **объему** и **достоверности** представленных результатов, **глубине** и **значимости** выводов работа полностью соответствует уровню диссертации на соискание степени кандидата наук. Полученные автором результаты представлены в четырех научных статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus и докладывались на международных и российских научных конференциях. Уровень публикаций достаточно высокий.

Считаю, что диссертация Шапенкова Севастьяна Владимировича на тему: «Взаимосвязь атомной структуры и люминесцентных свойств протяженных дефектов в нитриде галлия» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Шапенков Севастьян Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по

специальности 1.3.11. Физика полупроводников. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Председатель диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук,

профессор СПбГУ



Филатова Е.О.

Дата 15.11.2023 г.