

Donostia – San Sebastián, November 11th 2023

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета 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 1.3.11. Физика полупроводников.

Диссертационная работа Шапенкова С.В. рассматривает рекомбинационные свойства дислокаций и образованных ими протяженных дефектов в структуре гексагонального нитрида галлия, GaN. Актуальность темы диссертационного исследования определяется с одной стороны широким применением этого полупроводника для производства светодиодов и силовой электроники, а с другой – тем, что дислокации представляют собой сложные квантоворазмерные объекты пониженной размерности. Так, по своей атомной структуре совершенные, или полные дислокации являются одномерными объектами, а расщепленные дислокации и расширенные дислокационные узлы представляют собой комбинацию двумерных и одномерных систем. На практике кристаллические пленки гексагонального нитрида галлия в большинстве случаев содержат высокую плотность прорастающих дислокаций, так как выращиваются эпитаксиальными способами на разных коммерческих подложках с отличающимися от GaN параметрами решеток.

Дислокации в полупроводниках могут выступать в роли эффективных центров как безызлучательной, так и излучательной рекомбинации. В последнем случае возникают спектральные полосы собственной дислокационной люминесценции с характерными длинами волн. Такое явление хорошо известно для родственных GaN полупроводниковых материалов с тетраэдрической структурой таких, как CdS, ZnSe, Ge и Si. В этих материалах дислокационная люминесценция наблюдалась при низких температурах и была свойством только одного из типов дислокаций и состояла из одной или одного набора спектральных линий для всех исследованных образцов. Нитрид галлия в этом смысле оказался уникальным полупроводником, в котором винтовые дислокации в базисной плоскости приводили к различающимся по энергии полосам собственного излучения в образцах различного удельного сопротивления, а для низкоомных образцов его интенсивность превосходила интенсивность межзонного излучения при температурах даже выше комнатной. Эти необычные свойства послужили мотивацией постановки задачи рецензируемой работы. Для ее решения в диссертации Шапенкова С.В. проведены обширные экспериментальные исследования, результаты которых позволили впервые сопоставить спектральные свойства люминесценции дислокаций со структурными особенностями строения ядер последних. **Диссертация содержит большой набор новых и важных результатов**, среди которых можно выделить следующие:

- 1) разработана методика создания тонких образцов GaN, содержащих введенные дислокации, которые подходят для одновременного исследования методами просвечивающей электронной микроскопии и катодолюминесценцией;
- 2) обнаружены два типа расширенных дислокационных узлов на пересечении введенных дислокаций: одиночные треугольные и двойные треугольные, содержащие непрерывный дефект упаковки типа I_2 .
- 3) проведено прямое сопоставление расширенных дислокационных узлов с люминесцентной полосой IRL, обнаруженной в индентированных образцах GaN;
- 4) в легированном железом GaN продемонстрировано проявление люминесценции как от совершенных, так и от расщепленных дислокаций, то есть обусловленных разными механизмами, что подтверждено структурными исследованиями;

5) предложена теоретическая модель расчета величины расщепления дислокаций которая наряду упругим учитывает и кулоновского взаимодействие между частичными дислокациями. Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается их воспроизводимостью при использовании различных методов и проведении экспериментов на аналитическом оборудовании разных лабораторий. Интерпретация результатов базируется на общепринятых понятиях и законах.

Накопленные в диссертации экспериментальные данные и предложенные модели расширяют фундаментальные представления о физических свойствах дефектов структуры в полупроводниках и низкоразмерных квантовых систем. Дислокационное излучение в нитриде галлия, будучи устойчивым при рабочих температурах полупроводниковых приборов открывает перспективы его практического использования для создания новых светоизлучающих устройств.

Диссертация изложена ясным и грамотным языком, богато проиллюстрирована. По каждой оригинальной главе и работе в целом сформулированы основные выводы. Вместе с тем по диссертации можно сделать несколько замечаний:

- 1) в главе 2 приводится несколько формулы для описания использованных методов, которые затем не используются для интерпретации результатов в главах 3 и 4;
- 2) Рисунки 3.17d и 3.18 дублируют друг друга, достаточным было бы оставить в тексте только рисунок 3.18.
- 3) В таблицах 3.1 и 3.2 приводятся данные спектральных линий, полученные в различных точках образцов, но не приводится погрешность их определения, что не позволяет сделать вывод о совпадении или несовпадении этих линий.
- 4) для пояснения интерпретации дуплетной структуры люминесцентной полосы расширенных дислокационных узлов автор приводит диаграмму на рис. 3.25. Эта диаграмма несколько противоречит описанию в тексте, так как длинноволновая компонента имеет большую энергию перехода. Кроме того, в диссертации не сделана попытка оценить величину спектрального расщепления этого дуплета, хотя бы из простой теории деформационного потенциала.

Сделанные замечания не затрагивают основных выводов диссертации, которая представляет собой новое решение актуальной научной проблемы установления происхождения дислокационного излучения в нитриде галлия. Автор диссертации в совершенстве владеет техникой проведения исследований различными методами современной электронной микроскопии, интерпретацией структурных данных и люминесцентных спектров, а также их сопоставительным анализом. Результаты диссертации опубликованы в 4 публикациях в рецензируемых научных журналах, докладывались на 5 научных конференциях и хорошо известны специалистам.

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. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук,
профессор DIPС

/Вялых Д.В.

Дата 11.11.2023