

В диссертационный совет Д 212.232.33  
при Санкт-Петербургском  
государственном университете, 198504,  
Санкт-Петербург, Петеродворец, ул.  
Ульяновская, д.1

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **МЕДВЕДЕВА Олега Сергеевича**

«Дислокационная люминесценция в нитриде галлия», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

GaN и твёрдые растворы на его основе  $Al_xGa_{1-x}N$  и  $In_xGa_{1-x}N$  являются перспективными полупроводниками для силовой и оптоэлектроники. Вместе с тем, из-за отсутствия коммерчески доступных кристаллов GaN приемлемого качества для гомоэпитаксиального роста приходится выращивать кристаллы гетероэпитаксиально на наиболее экономически выгодных и доступных подложках сапфира, либо на подложках, подходящих для внедрения в современный технологический процесс микроэлектроники таких, как карбид кремния и кремний. Большая плотность дислокаций – одна из основных проблем гетероэпитаксиального роста GaN, которая остаётся наиболее острой и по сей день. Последнее обстоятельство стимулировало проведение интенсивных исследований, посвящённых изучению свойств ростовых дислокаций, в результате которых было выяснено, что определяющую роль на их электронные свойства играют точечные дефекты и примеси неизвестной природы, сегрегированные на дислокациях в процессе роста. Ранее считалось, что все типы дислокаций в GaN являются преимущественно безызлучательными центрами рекомбинации, однако работы 2014 года продемонстрировали, что чистые от примесных атмосфер дислокации, введенные локальной пластической деформацией могут быть излучательными центрами рекомбинации. Однако нынешний уровень понимания природы дислокационной люминесценции, в GaN до сих пор значительно уступает достигнутому для элементарных полупроводников – кремния и германия.

Полученные в работе **новые** результаты, которые, на мой взгляд, действительно **демонстрируют** наличие интенсивной линии с энергией излучения 3.1-3.2 эВ, вызванной свежевведёнными винтовыми дислокациями в базисной плоскости, представляют интерес не только с фундаментальной, но и практической точки зрения. Перспективность применения дислокационного излучения в нитриде галлия вызвана двумя основными свойствами: 1) высокой интенсивностью, превосходящей интенсивность зона-зонного перехода даже при комнатной температуре, и 2) термической стабильностью дислокационного излучения и структуры, необходимая для постпроцессинга в условиях промышленного применения. В работе **впервые** получены экспериментальные данные зависимости спектрального положения и интенсивности полосы дислокационной люминесценции от температуры,

механических напряжений, уровня возбуждения и концентрации свободных носителей. Изучение атомной структуры ядер винтовых дислокаций позволило построить модель пространственно прямых и не прямых переходов, а также объяснить спектральные особенности в точках пересечения свежевведённых дислокаций.

**Достоверность** положений и выводов диссертации подтверждается использованием современного экспериментального оборудования, и воспроизводимостью результатов для большого числа низкоомных кристаллов GaN различного удельного сопротивления.

**Замечаний нет.**

На основании знакомства с авторефератом и опубликованными работами считаю, что по научно-практическому значению, достоверности и новизне диссертационная работа Медведева Олега Сергеевича «Дислокационная люминесценция в нитриде галлия» полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Шретер Юрий Георгиевич

Профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического государственного университета Петра Великого (СПбПУ), доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников

Контактная информация:

Почтовый адрес: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая 29, 2-й учебный корпус, помещение 210, 212.

Тел.: (812) 552-9671

e-mail: yshreter@gmail.com

« 15 » мая 2018 г.

Подпись <i>Шретер Ю.Г.</i>
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист
по кадрам. <i>Васильева И.А.</i>
« 15 » 05 2018



В диссертационный совет Д 212.232.33  
при Санкт-Петербургском государственном  
университете, 198504, Санкт-Петербург,  
Петеродворец, ул. Ульяновская, д.1

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **МЕДВЕДЕВА Олега Сергеевича**

«Дислокационная люминесценция в нитриде галлия», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10– физика полупроводников

Основным способом получения нитрида галлия (GaN) является гетероэпитаксиальный рост. Как правило, используются подложки сапфира и кремния, имеющие существенное структурное отличие от GaN, следствием чего является большая плотность структурных дефектов в выращиваемых слоях. Проблема дефектности слоев, несмотря на успешное использование их в светодиодных структурах, остается актуальной и по сей день. Работы, посвященные изучению свойств ростовых дислокаций показали, что электронные свойства материала вблизи дислокаций преимущественно определяются вакансиями и примесными атомами сегрегированными на них в процессе роста. Такие дислокации в GaN являются преимущественно безызлучательными центрами рекомбинации, что снижает внешний квантовый выход кристаллов GaN. Вместе с тем, как показано автором работы **Медведевым О.С.** и рядом других исследователей, дислокации, введенные путем локальной пластической деформации, приводят излучательными рекомбинационным процессам. Актуальность исследования влияние дислокаций на люминесценцию GaN, которой посвящена данная работа, не вызывает сомнения.

Полученные в работе **новые** результаты по излучательной рекомбинации неравновесных носителей тока на свежевведенных винтовых дислокациях в первую очередь вызывает интерес высокой интенсивностью, превышающей интенсивность зона-зонного излучения, и термической стабильностью излучения вплоть до 420 К. Автором работы показано, что, именно, винтовые дислокации с вектором Бюргерса в направлении  $\langle 11-20 \rangle$  являются источниками высокоинтенсивной полосы с энергией примерно 3.1 эВ. В работе **впервые** получены экспериментальные данные зависимости спектрального положения и интенсивности полосы дислокационной люминесценции от температуры, механических напряжений, уровня возбуждения и концентрации свободных носителей. Изучение атомного строения ядер введенных винтовых дислокаций позволило автору построить подробную модель оптических переходов, а также объяснить спектральные особенности в точках пересечения свежевведенных дислокаций.

**Достоверность** положений и выводов диссертации подтверждается использованием современного экспериментального оборудования, и воспроизводимостью результатов для большого числа кристаллов GaN различного удельного сопротивления.

В качестве замечания по автореферату отмечу отсутствие в нем информации о люминесценции у трещин вблизи отпечатка пирамидки.

На основании знакомства с авторефератом и опубликованными работами считаю, что по научно-практическому значению, достоверности и новизне диссертационная работа Медведева Олега Сергеевича «Дислокационная люминесценция в нитриде галлия» полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

  
\_\_\_\_\_  
Николаев Владимир Иванович

внс-зав. лабораторией, к. ф-м.н, ФТИ им.А.Ф.Иоффе, РАН

Контактная информация:

Почтовый адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая, 26

Тел.: +7 9312382890

e-mail: nikolaev.v@mail.ioffe.ru

«\_21\_» \_\_\_\_\_мая \_\_\_\_\_ 2018 г.

*Ученый секретарь*

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе*



*А.Т. Шергин*

В диссертационный совет Д 212.232.33 при Санкт-Петербургском государственном университете, 198504, Санкт-Петербург, Петеродворец, ул. Ульяновская, д.1

### Отзыв

на автореферат диссертации Медведева Олега Сергеевича «Дислокационная люминесценция в нитриде галлия», представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Индустрия приборов на основе нитридов третьей группы успешно развивается. Однако многие фундаментальные свойства этих материалов, такие как особенности излучательной и безызлучательной рекомбинации, свойства протяженных дефектов изучены недостаточно, что препятствует реализации потенциальных возможностей этих материалов. Именно в этом ключе проведены исследования в диссертационной работе Медведева О.С., что предопределяет актуальность выбранной темы и значимость научных и практических результатов, полученных в работе. Одно из новых, малоизученных, направлений проведённых исследований, – дислокационная люминесценция нитрида галлия. Следует отметить, что диссертантом впервые в составе исследовательской группы удалось обнаружить это явление. Диссертационная работа Медведева Олега Сергеевича, судя по автореферату, является законченным исследованием, включающим новые научные и практически значимые результаты. В частности, впервые проведено систематическое изучение тонкой структуры дислокационной люминесценции в кристаллах нитрида галлия с разным уровнем легирования в широком температурном интервале. Показано, что винтовые дислокации, введенные локальной пластической деформацией в низкоомные кристаллы нитрида галлия, являются источником высокоинтенсивной полосы люминесценции, как при комнатной, так и при более высоких температурах. Установленная Медведевым О.С. в диссертационной работе устойчивость дислокационной структуры к высокотемпературным отжигам открывает возможность практического использования этого явления для создания светоизлучающих приборов. Важным научным результатом является предложенная в диссертационной работе модель оптических переходов в ядре расщепленной а-винтовой дислокации, хорошо описывающая наблюдаемые свойства дислокационного излучения.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе Медведева О.С., подтверждена их высокой воспроизводимостью на большом количестве монокристаллов нитрида галлия, выращенных различными методами.

Результаты диссертационной работы Медведева О.С. опубликованы в отечественных и зарубежных журналах и представлены на отечественных и международных конференциях.

Считаю, что автореферат диссертации Медведева О.С. полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников», а Медведев О.С. заслуживает присуждения ему искомой степени.

Сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26, Тел. (+7) 911-167-12-36, e-mail: Natalia.Shmidt@mail.ioffe.ru, Шмидт Наталия Михайловна)

г.н.с., доктор ф.-м. наук

/ Шмидт Н.М./



## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Медведева Олега Сергеевича  
«Дислокационная люминесценция в нитриде галлия», представленной на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

III-нитридные полупроводники на сегодняшний день служат основой для светодиодов и лазеров синего и УФ диапазонов, а в перспективе рассматриваются в качестве материалов для силовой электроники. В настоящее время из-за ограниченности возможностей получения объёмных кристаллов GaN III-нитридные структуры выращиваются гетероэпитаксиальными методами в основном на сапфире или карбиде кремния, что сопровождается появлением высокой плотности дислокаций в приборных структурах. Поэтому весьма важными как с научной, так и с практической точек зрения оказываются исследования свойств дислокаций в III-нитридах. В диссертации Медведева О.С. изучается явление дислокационной люминесценции, связанное с винтовыми дислокациями в GaN, что однозначно говорит об актуальности темы рассматриваемой работы.

Результаты, полученные в работе, демонстрируют появление высокоинтенсивной полосы люминесценции с энергией 3.1-3.2 эВ, которая связана с винтовыми дислокациями ростового происхождения, залегающими в базисной плоскости GaN. Исследование структуры винтовых дислокаций методами ПЭМ показывает, что дислокации являются расщеплёнными. Данный результат позволил автору сформулировать модель пространственно прямых и не прямых переходов, объясняющую наблюдаемые в эксперименте зависимости. В диссертации также обсуждается интересный и важный факт, свидетельствующий о том, что места пересечения дислокаций образуют структуры с отличной от упомянутой выше энергией излучения, а именно, с более высокой энергией порядка 3.3 эВ.

Судя по автореферату и опубликованным статьям по теме диссертации, считаю, что по научно-практическому значению, достоверности и новизне рассматриваемая работа полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а сам Медведев Олег Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников.



Романов Алексей Евгеньевич,  
доктор физико-математических наук,  
заведующий сектором теории твердого тела  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН;  
контактная информация:  
почтовый адрес: Политехническая 26, 194021, СПб  
тел. +7-812-2927304  
e-mail: [aer@mail.ioffe.ru](mailto:aer@mail.ioffe.ru)



«23» 05 2018 г.

В диссертационный совет Д 212.232.33  
при Санкт-Петербургском государственном  
университете, 198504, Санкт-Петербург,  
Петеродворец, ул. Ульяновская, д.1

### ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **МЕДВЕДЕВА Олега Сергеевича**  
«Дислокационная люминесценция в нитриде галлия», представленной на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Исследования, проведенные в диссертационной работе О.С. Медведева, являются в настоящее время весьма актуальными, поскольку кристаллы нитрида галлия повсеместно используются для производства светодиодов видимого и УФ диапазонов, а также силовой и высокочастотной электроники. Гетероэпитаксиальный рост кристаллов GaN является причиной высокой плотности дислокаций, которые в свою очередь негативно влияют на выходные параметры и срок службы устройств на базе GaN. Изучение свойств дислокаций носит не только фундаментальный характер, но также является важным и с практической точки зрения для совершенствования технологического процесса изготовления светоизлучающих устройств.

По моему мнению наиболее интересными являются следующие результаты исследования:

- Обнаружена ранее не наблюдавшаяся в GaN полоса излучения 3.1 эВ, источником которой являются винтовые дислокации, введенные локальной пластической деформацией после завершения процесса роста кристалла. Важной особенностью данного излучения является высокая интенсивность, которая превышает интенсивность зона-зонного перехода;

- Термическая стабильность дислокационной структуры и излучения имеет важное практическое значение с точки зрения возможности разработки светоизлучающих структур на основе дислокационного излучения;

- Представлена модель оптических переходов, объясняющая наблюдаемые свойства дислокационного излучения, которая основана на знаниях атомного строения дислокации и возможности пространственно прямых и непрямых переходов.

Представленная работа вносит большой вклад в исследование электронных свойств дислокаций в бинарных полупроводниках. Результаты работы Медведева О.С. соответствуют современному уровню развития науки и несомненно имеют практическую значимость. Положения, выносимые на защиту, адекватны полученным результатам, хорошо обоснованы и опубликованы в рецензируемых журналах. Автореферат написан на хорошем научном языке, содержит достаточное количество иллюстраций.

Диссертационная работа Медведева Олега Сергеевича «Дислокационная люминесценция в нитриде галлия» полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Ушакова Елена Владимировна

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптической физики и современного естествознания, Университет ИТМО

Контактная информация:

Почтовый адрес: 14, Биржевая линия, г. Санкт-Петербург, Россия

Тел. +7-812-457-18-80

e-mail: elena.ushakova@corp.ifmo.ru

« 5 » июня 2018 г.

