

ОТЗЫВ

официального оппонента Николаева Владимира Ивановича
на диссертационную работу Копьева Виктора Васильевича
«Влияние встроенных электрических полей на перенос носителей заряда
в излучающих структурах InGaN/GaN», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников

Диссертационная работа В. В. Копьева посвящена исследованию электрических и оптических свойств структур с множественными квантовыми ямами и сверхрешетками InGaN/GaN в том числе при низких температурах.

Актуальность проведенных в диссертации исследований не вызывает сомнений. Ранее диапазон низких температур практически не изучался. Не было дано объяснение роста квантовой эффективности светодиодных структур при электролюминесценции, когда температура опускалась до области «вымораживания» носителей в p -области. Не наблюдалось участков отрицательной дифференциальной проводимости на вольт-амперных характеристиках структур с квантовыми ямами и сверхрешетками InGaN/GaN.

Научная новизна основных результатов диссертационной работы:

В работе В. В. Копьева экспериментально обнаружены участки отрицательного дифференциального сопротивления в структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN с толщиной барьеров GaN 6 нм, связанные, как показано, с резонансными туннельными переходами между разрешенными уровнями энергии в соседних несвязанных квантовых ямах. Процессы резонансного туннелирования в структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN объясняются с наличием трех разрешенных уровней энергии, что связано с наличием сильного встроенного электрического поля. Отсутствие участков при повышении толщины барьеров до 12 нм поясняется снижением вероятности туннелирования электронов сквозь энергетический барьер. Показано, что в области температур от 160 до 220 К и в области высоких напряжений транспорт носителей носит баллистический характер, и при этом наблюдается снижение квантовой эффективности электролюминесценции. В то время, как при невысоких напряжениях (менее 3 В) сказывается туннелирование дырок из примесных состояний по структурным дефектам в область множественных квантовых ям. В диссертации предложена модель транспорта носителей «горячих» электронов над областью квантовых ям InGaN/GaN, а также модель туннелирования дырок с примесных состояний Mg, находящихся в области p -GaN, в активную область.

Диссертация В. В. Копьева логично структурирована, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы. В заключении сформулированы наиболее значимые результаты диссертации.

Все наблюдаемые эффекты анализируются с учетом наличия сильных электрических полей спонтанной и пьезоэлектрической поляризации в квантовых ямах InGaN/GaN.

Представленные в диссертационной работе Копьева В. В. результаты имеют фундаментальное и прикладное значение, вносят вклад

в развитие физических представлений о переносе носителей заряда в наногетероструктурах на основе нитридных соединений.

Обнаруженные участки отрицательной проводимости, свидетельствуют о множественном характере разрешенных уровней в квантовых ямах InGaN/GaN. Это открывает возможность для создания на основе исследуемых структур резонансно-туннельных диодов и эффективных квантово-каскадных лазеров, принцип работы которых основан на межподзонных переходах в квантовых ямах.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается тем, что проведено системное исследование, на партиях образцов, где характеристики многократно воспроизводились; математические модели адекватно описывают рассматриваемые физические процессы.

Основные результаты проведенного исследования представлены в 17 работах, в том числе 7 статьях в журналах, включенных в Перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 3 статьях в сборниках трудов конференций, представленных в изданиях, входящих в международную базу Web of Science. Результаты научной работы также были представлены на российских и международных конференциях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы.

Из недостатков работы следует отметить:

1. Список литературы содержит мало ссылок на работы последних трех лет.

2. Следовало бы ссылаться и на публикации 2019 года. Например, Light-Emitting Diodes. Materials, Processes, Devices and Applications Под редакцией : Li, Jinmin, ZHANG, G. Q. Springer, 2019. ISBN 978-3-319-99211-2

3. На стр. 15 заявлено, что «лабораторные образцы имеют световую отдачу около 250 лм/Вт» со ссылкой на работу 2010 года, в списке литературы под номером [20]. Вместе с тем, еще 2014 году, компания Cree анонсировала светодиоды более 300 лм/Вт (<https://www.cree.com/news-media/news/article/cree-first-to-break-300-lumens-per-watt-barrier>). Однако, в любом случае надо делать оговорку, на какой длине волны достигнуто рекордное значение.

4. стр. 44 рисунок 2.4. При плотности дислокаций 10^8 см^{-2} размер поля изображения должен быть больше $2 \times 2 \text{ мкм}$. Для статистики нужно хотя бы десятков–сотню дислокаций выявить.

5. стр 48, в таблице 2.2. Необычное обозначение концентрации p с нижним индексом Mg, неясно это концентрация дырок или концентрация акцепторной примеси.

6. стр 51. Не приводится объяснения, как из спектров пропускания достоверно получать толщину квантовой ямы и как применить формулу 2.2 к многослойной структуре.

7. стр 62. Параметры квантовых ям определены из оптических спектров пропускания. Логичнее и точнее было получить толщины и составы из рентгеновской дифракции, которые приводятся.

8. стр 75 указывается, что «имеющееся в лазерах зеленого диапазона со встроенными полями напряженностью больше 0.3 В/см» [Вероятно МВ/см].

9. Подписи под рисунками в некоторых случаях слишком лаконичны и заставляют догадываться, что изображено. Например, на стр. 64 Рис. 3.4 и 3.5, где обсуждаются результаты рентгеновской дифракции.

В тексте к ним надо уточнить, что (0002) – отражение от базисной плоскости.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа Копьева Виктора Васильевича «Влияние встроенных электрических полей на перенос носителей заряда в излучающих структурах InGaN/GaN» является законченным научным исследованием и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (ред. от 01 октября 2018 г.), а ее автор, Копьев Виктор Васильевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник – заведующий лабораторией

Физики профилированных кристаллов

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

кандидат физико-математических наук

(01.04.07 – Физика конденсированного состояния)

Николаев Владимир Иванович

26.11.2019

Подпись Николаева Владимира Ивановича
удостоверяю.

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе



М.И. Патров