

ОТЗЫВ

официального оппонента,

доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника, исполняющего обязанности заведующего лабораторией молекулярно-лучевой эпитаксии соединений A_3B_5 Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН» Журавлева Константина Сергеевича на диссертационную работу Бушуйкина Павла Александровича «Оптические и фотоэлектрические свойства нитрида индия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. — электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Актуальность темы.

Использование широкозонных A_3 -нитридных полупроводников в оптоэлектронных и электронных устройствах стало впечатляющей успешной историей последних лет. Развитие технологии A_3 -нитридных полупроводников и создание высокоэффективных источников излучения было увенчано присуждением Нобелевской премии по физике в 2014 году японским ученым И. Акасаки, Х. Аmano, С. Накамуре. Всё возрастающие потребности в светоизлучающих диодах и лазерах стимулируют проведение широкого поиска новых активных сред, способов воздействия на них, методов синтеза и дизайна твердотельных структур, изучения и углубления понимания, протекающих в них процессов с целью получения оптического излучения в различных спектральных диапазонах. Поэтому разработка и создание элементов фотоники, обеспечивающих выход на новые уровни применения, является актуальным. Прямозонный полупроводник InN, имеющий запрещенную зону вблизи 0.67 эВ, позволяет продвинуться в инфракрасную область спектра, создавать оптоэлектронные приборы для скоростных фотоприемных устройств и телекоммуникаций. В связи с этим диссертационная работа Бушуйкина П.А., посвященная экспериментальному изучению оптических свойств InN, исследованиям связи структурных и электрофизических характеристик InN с фотоэлектрическими и генерационными свойствами материала без сомнения является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержащего основные результаты, двух приложений, списка сокращений и условных обозначений, списка цитируемой литературы и списка основных публикаций автора по теме работы. Объем диссертации составляет 98 страниц, включая 32 рисунка и 13 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 163 наименования.

Во введении отражены требуемые признаки квалификационной работы, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Описаны актуальность темы исследования и степень ее разработанности, цель работы, объекты и методы исследования, его научная новизна и практическая значимость, степень достоверности результатов, апробация работы и положения, выносимые на защиту. Перечислены публикации и описан личный вклад автора.

Первая глава представляет собой обзор современного состояния выбранной темы и определяет основные задачи диссертационной работы. Представлен обзор методов выращивания слоев InN и описаны проблемы, затрудняющие получение высококачественных слоев InN. Рассмотрено влияние условий роста слоев на структурные и электрофизические характеристики материала. Приведены литературные данные, свидетельствующие о нестабильности состава InN. Рассматривается зонная структура InN и особенности оптических переходов в вырожденном n-InN. Отмечается, что InN не подчиняется феноменологическому правилу, согласно которому ширина запрещенной зоны прямозонного перехода в Γ -точке должна убывать в ряду изоморфных кристаллических структур с увеличением атомного номера катиона или аниона. А вот недавние теоретические расчеты зонной структуры хорошо согласуются с недавними экспериментально полученными результатами. Приведен обзор оптических методов определения ширины запрещенной зоны InN, отмечено, что фотоэлектрические эксперименты не применялись для получения данных о зонной структуре InN, а имеющиеся результаты исследования спектров и кинетики фотопроводимости InN противоречивы. Особое внимание уделено имеющимся попыткам реализации стимулированного излучения и лазерной генерации в низкоразмерных структурах на основе InN и InGaN в ИК диапазоне, отмечается, что стимулированное излучение в слоях InN не наблюдалась. На основе литературного обзора определены задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований оптических свойств слоев InN, выполненных в диссертационной работе. Приведены результаты экспериментальных исследований спектров поглощения, фотолюминесценции и фотопроводимости InN, представлены данные о ширине запрещенной зоны, характере излучательных переходов, связи оптических и электрофизических характеристик с условиями роста InN. В спектрах фотолюминесценции присутствуют полосы, хорошо описываемые переходами «зона-зона» и «зона-акцептор». В спектрах образцов, выращенных при избытке индия, обнаружена низкоэнергетическая полоса фотолюминесценции, сдвинутая относительно переходов «зона-зона» на ~ 100 мэВ. Высказано предположение, что эта полоса связана с акцепторами, включающие вакансии азота, образующимися при сильном легировании донорами. Уточнена калибровочная зависимость энергии края межзонных переходов от концентрации свободных носителей (электронов). По данным диссертации точность определения концентрации свободных электронов

по спектрам поглощения невысокая, но позволяет получить информацию быстро, не разрушая образец. Описана методика измерения быстрой (наносекундной) кинетики фотопроводимости. Продемонстрирована быстрая отрицательная фотопроводимость. Изучена связь оптических и электрофизических характеристик с ростовыми условиями слоев InN. Исследованы характеристики слоев, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии тремя различными способами.

В третьей главе приведены результаты тщательного исследования кинетики фотопроводимости слоев InN с временным разрешением от единиц наносекунд до сотен секунд. Варьировалась длина волны, плотность мощности возбуждающего излучения и температура измерений. Исследовались образцы с различной равновесной концентрацией свободных электронов. Наблюдалась наносекундная и относительно медленная микросекундная кинетика фотопроводимости, что свидетельствует о существенно различающихся процессах рекомбинации возбужденных носителей заряда. Наиболее интригующим является обнаружение быстрого уменьшения фотопроводимости и изменение знака фотоотклика при изменении условий эксперимента. Обсуждаются механизмы отрицательной межзонной фотопроводимости InN с микросекундными временами релаксации и механизмы, приводящие к отрицательной наносекундной фотопроводимости. Рассмотрено несколько таких механизмов: релаксация горячих электронов, с энергией вблизи границы активной области, уменьшение подвижности электронов вследствие захвата возбужденных дырок нейтральными ловушками, а также Оже-рекомбинация и рекомбинация неравновесных носителей заряда на поверхности слоев. На основе проведенного анализа сделан вывод, что отрицательная фотопроводимость связана, скорее всего, с образованием заряженных центров при захвате фотовозбужденных дырок на нейтральные ловушки, приводящим к дополнительному рассеянию и уменьшению подвижности электронов.

В четвертой главе сообщается о получении и исследовании стимулированного излучения в слоях InN. Показано, что при увеличении плотности мощности накачки происходит качественное изменение спектров эмиссии. При превышении порогового значения плотности мощности накачки вблизи максимума полосы спонтанной люминесценции возникает узкая линия эмиссии. Интенсивность этой линии растет суперлинейно с увеличением мощности накачки, что вместе с пороговым изменением формы спектра свидетельствует о возникновении стимулированной эмиссии на межзонных переходах. Исследована зависимость стимулированного излучения в слоях InN от концентрации электронов, температуры, структуры и состава эпитаксиального слоя. Показано, что линия стимулированного излучения смещается в длинноволновую область и сужается при уменьшении концентрации равновесных свободных электронов. Порог стимулированной эмиссии снижается при уменьшении концентрации равновесных электронов и экспоненциально растет при увеличении температуры. Был оценен коэффициент оптического усиления на межзонных переходах в слоях InN, в наиболее чистых образцах коэффициент усиления превышает 200 см^{-1} при температуре

$T=78\text{K}$. Установлено также, что высокая концентрация равновесных электронов, включения металлической фазы, колончатая структура слоев InN и локализованные акцепторные состояния являются препятствием для реализации стимулированного излучения.

В заключении представлены основные научные результаты, полученные соискателем, которые лежат в основе трех положений, выносимых на защиту.

Научная новизна и практическая значимость исследований. В диссертации П. А. Бушуйкина представлены результаты, обладающие научной новизной, среди которых можно выделить:

- обнаружение и исследование фотоотклика слоев n-InN с высоким (наносекундным) временным разрешением;
- разработка методики определения концентрации свободных электронов в InN по красной границе фотопроводимости и поглощения;
- обнаружение новой полосы эмиссии, с энергией ниже, чем у доминирующих переходов «зона-зона» в спектрах фотолюминесценции слоев n-InN с концентрацией равновесных электронов порядка 10^{19} см^{-3} ;
- получение стимулированного излучения в диапазоне длин волн $\lambda=1.66\text{-}1.89\text{ мкм}$ на межзонных переходах в планарных волноводных гетероструктурах InN/GaN/AlN/Al₂O₃ с активным слоем InN при температурах до 215 К.

Полученные результаты представляют большой интерес как с научной точки зрения – для понимания процессов рекомбинации и фотопроводимости в слоях InN, так и для создания фотоприемных и лазерных структур для телекоммуникационного ИК диапазона спектра.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечивается корректной постановкой цели и задач исследования, использованием современных экспериментальных и технологических методов. Представленные экспериментальные результаты согласуются с расчетами и результатами, полученными другими авторами, не противоречат существующим научным представлениям и прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Основные результаты диссертационной работы получены соискателем либо лично, либо в соавторстве и легли в основу 5 статей в периодических научных изданиях, индексируемых в базах РИНЦ, Scopus и Web of Science.

Замечания по работе.

1. В диссертационной работе длинноволновая полоса эмиссии связана с излучательными переходами свободных электронов на акцепторное состояние с энергией связи $\sim 100\text{ мэВ}$. Однако это не подтверждено экспериментальными данными, например, температурной зависимостью фотолюминесценции. Не обсуждается причина изменения интенсивности длинноволновой полосы по площади образцов.

2. При оценке скорости поверхностной рекомбинации используется амбиполярная диффузия носителей заряда. Насколько справедлив такой подход, учитывая наличие электрического поля (изгиба зон) вблизи поверхности, которое препятствует диффузии дырок к центрам рекомбинации на поверхности? Нет пояснения, почему скорость поверхностной рекомбинации при температуре жидкого азота больше, чем при комнатной температуре.
3. В работе отсутствует обсуждение зависимости ширины полосы стимулированной эмиссии от концентрации равновесных электронов. Каков вклад не прямых в пространстве квазиимпульсов переходов в спектр стимулированной эмиссии? Требуется пояснение различия наклона интенсивности стимулированной эмиссии от плотности мощности накачки для образцов с различной концентрацией равновесных электронов.
4. В тексте диссертации есть несколько опечаток. На странице 38 есть ссылка на выражение (2.1.6), которого нет. На странице 62 написано, что происходит излучательная рекомбинация локализованных дырок со свободными экситонами(?).

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку представленного диссертационного исследования.

Общее заключение. Диссертация Бушуйкина П.А. является научно-квалификационной работой и представляет собой цельное завершённое исследование, выполненное на высоком научно-техническом уровне. Работа написана хорошим русским языком, содержание и результаты исследований изложены четко и понятно. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание, основные результаты, научные положения и выводы. Полученные результаты вносят значительный вклад в развитие физики оптических и фотоэлектрических процессов в нитриде индия с целью создания активной среды, расширяющей спектральный диапазон приборов твердотельной электроники на основе A_3 -нитридов. По своей теме и содержанию работа соответствует специальности 2.2.2. — «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Диссертация «Оптические и фотоэлектрические свойства нитрида индия» по форме и содержанию соответствует всем критериям, установленным в пунктах 9, 10, 11, 13 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 года № 842 и предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Диссертант, Бушуйкин Павел Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. — «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Официальный оппонент

ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией
молекулярно-лучевой эпитаксии соединений A_3B_5 Федерального государственного бюджетного
учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН»
доктор физико-математических наук
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 13,
Тел.: (383) 3304475; E-mail: zhur@isp.nsc.ru

«06» сентября 2022



Журавлев Константин Сергеевич

Подпись Журавлева К. С. заверяю
ученый секретарь ИФП СО РАН
к.ф.-м.н.



С. А. Аржанникова