



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080
office@spbstu.ru

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научно-организаторской
деятельности ФГАОУ ВО «СПбПУ»,
доктор технических наук



Клочков Ю.С.

19 сентября 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» – на диссертацию **Бушуйкина Павла Александровича** на тему: «**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 работы

Несмотря на интенсивное развитие физики и технологии оптоэлектронных устройств длинноволновой части ближнего инфракрасного диапазона (1 – 2 мкм) существует очевидная потребность в повышении эффективности излучателей и детекторов, работающих в этой области спектра. Важнейшая, но не единственная область применения таких приборов – телекоммуникации. Одним из путей совершенствования источников и детекторов излучения является поиск новых материалов. Уникальным набором материалов для оптоэлектроники являются нитриды элементов III группы, параметры которых позволяют создавать оптоэлектронные приборы, работающие в широком спектральном диапазоне. Одним из таких материалов является нитрид индия, имеющий малую ширину запрещенной зоны порядка 0,6 – 0,7 эВ. До сих пор основное внимание привлекали широкозонные нитриды, физика и технология которых уже получили достаточное развитие. Между тем параметры нитрида индия позволяют создавать на его основе приборы,

работающие в длинноволновой области спектра. Разработка оптоэлектронных приборов на основе нитрида индия сдерживается технологическими трудностями получения качественных эпитаксиальных слоев и отсутствием систематических исследований их оптических и фотоэлектрических свойств. В настоящей работе проводится детальное исследование оптических характеристик эпитаксиальных слоев нитрида индия и их сопоставление с технологическими параметрами роста слоев. Учитывая все сказанное выше, можно сделать вывод, что тема диссертационной работы Бушуйкина Павла Александровича несомненно является **актуальной**.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений, списка сокращений и условных обозначений, списка цитируемой литературы и списка основных публикаций автора по теме работы.

Во **введении** дано обоснование актуальности выбранной темы, сформулирована цель диссертационной работы, показаны ее научная новизна и практическая значимость, поставлены задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена обзору литературы по теме исследования. Анализируются основные методы выращивания эпитаксиальных слоев нитрида индия. Приводятся известные данные по зонной структуре InN, описываются методы ее расчета, результаты которого сопоставляются с экспериментальными данными. Описаны разрешенные оптические переходы. Дается обзор исследований поглощения, фотолюминесценции и фотопроводимости. Описан медленный отрицательный фотоотклик. Приводятся результаты исследования электролюминесценции в гетероструктурах InN/GaN и стимулированного излучения из структур на основе InN с пониженной размерностью. На основе сделанного обзора ставятся задачи диссертационного исследования.

Глава 2 посвящена исследованию поглощения, фотопроводимости и фотолюминесценции в эпитаксиальных слоях нитрида индия. В начале главы описывается методика роста исследуемых слоев и приводятся параметры образцов. По спектрам поглощения определена ширина запрещенной зоны. Предложена методика определения равновесной концентрации свободных электронов по спектрам поглощения. Обсуждаются спектры фотолюминесценции для различной концентрации

электронов, вводится понятие эффективной ширины запрещенной зоны. Делается предположение о наличии локализованных акцепторных состояний с энергией ионизации около 100 мэВ в образцах, выращенных в металлообогащенных условиях. Приводятся результаты исследования спектров межзонной фотопроводимости. Анализируется связь оптических и электрофизических характеристик слоев с условиями роста.

В главе 3 приводятся результаты исследования кинетики межзонной фотопроводимости с наносекундным разрешением. Показано наличие отрицательной фотопроводимости в образцах с большой концентрацией свободных электронов, обсуждается ее механизм, основанный на захвате неравновесных дырок на нейтральные центры, приводящий к росту интенсивности рассеяния электронов.

В главе 4 приводятся результаты наблюдения стимулированного излучения при оптической накачке. Определены пороговые интенсивности накачки и коэффициент усиления. Обсуждаются факторы, препятствующие возникновению стимулированного излучения.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложениях А и Б приведены экспериментальные данные, демонстрирующие влияние локализации носителей заряда на кинетику, спектры и температурную зависимость люминесценции исследуемых слоев.

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается, в первую очередь, в следующем:

1. Впервые исследована кинетика фотопроводимости нитрида индия в наносекундном диапазоне. Показано, что в образцах со значительной концентрацией свободных электронов возможно наблюдение отрицательной фотопроводимости. Предложен механизм отрицательной фотопроводимости, связанный с захватом неравновесных дырок на нейтральные центры, приводящим к увеличению вероятности рассеяния электронов и уменьшению подвижности при освещении.

2. Впервые получено стимулированное излучение в диапазоне длин волн 1.66-1.89 мкм при оптической межзонной накачке слоев InN/GaN/AlN/Al₂O₃, связанное с межзональными переходами электронов в слое InN.

3. В спектре фотолюминесценции эпитаксиальных слоев InN, выращенных в металлообогащенных условиях присутствует полоса с энергией ниже, чем у основного перехода, что может свидетельствовать о наличии локализованных состояний акцепторов с энергией ионизации около 100 мэВ.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, не вызывает сомнений. Она подтверждается применением высокоточных методик, основанных на современных экспериментальных приборах и установках, а также использованием для выращивания структур прецизионного и контролируемого метода молекулярно-пучковой эпитаксии. Результаты, полученные на образцах, выращенных на различных ростовых установках, соответствуют друг другу. Полученные экспериментальные результаты сопоставляются с расчетами и литературными данными. Материалы диссертации прошли апробацию на значимых международных и российских конференциях. Результаты работы опубликованы, в том числе, в ведущих рецензируемых журналах.

Практическая ценность работы, наряду с изложенным ранее, заключается в следующем:

1. В работе развит ряд методов диагностики эпитаксиальных слоев. Так определение красной границы фотопроводимости и поглощения позволяет бесконтактным образом определять концентрацию свободных носителей заряда. Сравнение спектров поглощения и фотопроводимости со спектрами люминесценции позволяет оценить однородность эпитаксиальных слоев. Анализ спектров люминесценции позволяет контролировать формирование локализованных примесных состояний.

2. Определены факторы, препятствующие возникновению стимулированного излучения в слоях InN: неоднородность эпитаксиальных слоев, наличие включений металлической фазы индия, высокая концентрация глубоких примесно-дефектных центров.

3. При исследовании стимулированного излучения определен коэффициент усиления на длине волны около 1,65 мкм, превышающий 200 см^{-1} в наиболее чистых

образцах при температуре 78 К. Пороговая мощность для лучших образцов составила 400 Вт/см^2 при температуре решетки 8 К и 6 кВт/см^2 при 78 К.

Рекомендации для использования результатов и выводов диссертационной работы

Полученные в работе результаты и развитые подходы могут быть использованы при разработке источников и детекторов излучения ИК диапазона (1 – 2 мкм). Результаты работы могут быть использованы при разработке оптоэлектронных приборов нового поколения в различных научно-исследовательских и производственных организациях, среди которых можно выделить такие как Институт физики микроструктур РАН, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Институт физики твердого тела РАН, Санкт-Петербургский государственный университет, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Академический университет им. Ж.И. Алфёрова, Университет ИТМО, Новосибирский государственный технический университет и др.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, связанную с исследованием новых материалов для оптоэлектронных приборов длинноволновой части ближнего ИК диапазона, и представляющую в настоящее время как научный, так и практический интерес. Автором использованы структуры, выращенные надежными технологическими методами, обобщены результаты всех проведенных исследований, четко сформулированы и обоснованы основные научные выводы диссертационной работы.

Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы и соответствует ее основным положениям.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на в целом положительное мнение о диссертации, к ней имеются некоторые вопросы и замечания:

1. При описании экспериментальных образцов не указано за счет чего создавалась равновесная концентрация электронов, которая менялась в значительных пределах.

2. В формуле 1.3.2 вклад в межзонное поглощение не прямых переходов электронов учитывается введением коэффициента γ . Однако очевидно, что нормировочная константа A в этой формуле также будет разная для случаев прямых и не прямых переходов.

3. В спектрах фотолюминесценции образца GS1804-2 присутствует особенность, которую авторы связывают с оптическими переходами зона проводимости – акцепторный уровень. В чем причина отсутствия особенностей, связанных с акцепторным уровнем в спектрах поглощения и фотопроводимости этого образца?

4. В работе делается вывод о влиянии концентрации свободных электронов на знак фотопроводимости при импульсном возбуждении. Однако соответствующие экспериментальные результаты получены при изменении не только концентрации электронов, но и энергии кванта возбуждающего излучения (рис. 3.1.1). Возможно ли, что знак фотопроводимости определяется также и этим вторым фактором?

5. В работе использовано выражение "хвосты Урбаха валентной зоны", что не вполне корректно. Понятие "хвост Урбаха" применяется к описанию спектров межзонного поглощения.

6. Замечание по оформлению. Буквой T в работе обозначается как температура, так и пропускание; буквой μ обозначена приведенная эффективная масса и подвижность.

Указанные замечания не являются принципиальными, не противоречат результатам и выводам, сформулированным в работе, и не уменьшают, тем самым, научную значимость проведенного П.А. Бушуйкиным исследования.

Заключение

Диссертационная работа Бушуйкина Павла Александровича на тему: «Оптические и фотоэлектрические свойства нитрида индия», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая существенное значение для современной физики полупроводников – исследованы оптические и фотоэлектрические свойства нитрида индия – перспективного материала

для использования в источниках и детекторах излучения инфракрасного диапазона 1-2 мкм.

Таким образом, диссертация Бушуйкина Павла Александровича полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (п. 9 Положения ВАК о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях постановления Правительства РФ)), а он сам несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Высшей инженерно-физической школы, протокол № 9 от 6 сентября 2022 г.

Отзыв подготовил:


профессор Высшей инженерно-физической школы,
доктор физико-математических наук, профессор



Дмитрий Анатольевич Фирсов

Председатель заседания:

директор Высшей инженерно-физической школы,
доктор физико-математических наук



Иван Сергеевич Мухин

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Адрес: 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Телефон: +7 (812) 775-05-30

E-mail: office@spbstu.ru