

На правах рукописи



Лазаренко Александра Анатольевна

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР
НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ $GAP(As,N)$ НА ПОДЛОЖКАХ Si И GAP

Специальность: 01.04.10 - физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2020

Работа выполнена в лаборатории наноэлектроники Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

Научный руководитель:

Никитина Екатерина Викторовна

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории наноэлектроники федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

Официальные оппоненты:

Тарасов Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Фотоники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Папроцкий Станислав Константинович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории Электронных процессов в полупроводниках федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН», г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт аналитического приборостроения Российской Академии наук» (ИАП РАН), г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «19» марта 2020 г. в 14:00 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан «17» января 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04
д.ф.-м.н., профессор



Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время параметры кремниевых приборов практически достигли своего теоретического предела [1], поэтому пристальное внимание уделяется созданию монокристаллических оптоэлектронных интегральных схем (МОЭИС) на кремнии, как одному из самых перспективных путей увеличения быстродействия кремниевых приборов. Получение МОЭИС непосредственно на основе кремния является чрезвычайно сложной задачей из-за непрямой структуры электронных зон кремния.

В последние десятилетия большой научный интерес представляет интеграция кремния и прямозонных материалов АПВВ для создания эффективных светоизлучающих приборов [2-4]. Интеграция прямозонных материалов АПВВ и кремния позволит увеличить быстродействие интегральных схем за счет оптической передачи сигнала.

Однако получение монокристаллических кристаллов на основе АПВВ и кремния имеет ряд проблем: сложность получения решеточно-согласованных прямозонных материалов АПВВ на кремнии; различие коэффициентов термического расширения (КТР), а также различное число валентных электронов материалов АПВВ и кремния [5].

Используя определенные составы соединений АПВВ можно получить решеточно-согласованный с кремнием прямозонный материал. В настоящее время одним из возможных путей решения этой проблемы является использование тройных или четверных соединений на основе АПВВN, например, InGaPN и GaP(As)N, с содержанием азота на уровне нескольких процентов (разбавленные нитриды) [6-8].

Известно, что соединения АПВВN обладают нетривиальными свойствами, вызванными высокой электроотрицательностью азота, например, необычной композиционной зависимостью ширины запрещенной зоны твердых растворов АПВВ_{1-x}N_x, а именно, уменьшением ширины запрещенной зоны твердого раствора с уменьшением постоянной кристаллической решетки [9]. Также в разбавленных нитридах было обнаружено несколько новых эффектов, таких как увеличение эффективной массы электрона при увеличении концентрации азота и изменение природы фундаментальных свойств соединений, например, GaP_{1-x}N_x, а именно переход от непрямозонной к прямозонной зонной структуре, уже при концентрациях азота менее одного процента [10].

Очевидно, что уникальные свойства соединений АПВВN могут быть использованы для создания приборов оптоэлектроники, таких как светоизлучающие диоды, солнечные элементы, биполярные транзисторы и т.д. [6-8]. Поэтому изучение структурных, электронных и оптических свойств таких

соединений, а также влияние параметров эпитаксиального процесса на них, представляет несомненный научный интерес и является актуальной научной задачей.

Отдельной сложной задачей является разработка конструкции и создание светоизлучающих приборов на основе соединений АІІВVN на подложке кремния. Например, как уже было отмечено выше, из-за рассогласования постоянных решеток соединений АІІВVN и кремния, на их интерфейсе возможно возникновение большой плотности дефектов. Такие дефекты могут быть губительны для оптических приборов из-за паразитной рекомбинации. Таким образом, требуется разработка оригинального дизайна структуры светоизлучающего прибора.

Более того, синтез соединений АІІВVN также является сложной задачей из-за неравновесных физических свойств, таких как, большое несоответствие размеров и электроотрицательности атомов азота и других атомов третьей и пятой группы [11,12]. Неоднородность состава, возникающая в процессе роста, может также приводить к возникновению дефектов, которые отрицательно влияют на структурные и оптические свойства слоев.

Для получения АІІВVN соединений с несколькими элементами третьей и/или пятой группы необходимо привлечение высокотехнологичных методов, при которых рост полупроводниковой пленки происходит с прецизионным контролем состава, уровня легирования и толщины.

Одним из основных методов получения таких сложных полупроводниковых соединений, как разбавленные нитриды, является молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ), которая позволяет выращивать слои с претензионным контролем в процессе роста в сверхвысоком вакууме с минимальным количеством дефектов в слое [13,14].

Таким образом, на сегодняшний день разбавленные нитриды являются перспективным материалом для создания оптоэлектронных приборов на кремниевых подложках, но до сих пор существует ряд нерешенных задач, связанных с синтезом этих материалов, исследованием влияния параметров эпитаксиального процесса на свойства соединений АІІВVN, а также созданием на основе разбавленных нитридов на подложках кремния светодиодов и изучения их свойств, что обуславливает **актуальность темы диссертации.**

Основной целью настоящей работы является исследование свойств структур на основе полупроводниковых твердых растворов GaP(As,N) с содержанием азота от 0 до 2%, создание светоизлучающих диодов на основе разбавленных нитридов на подложке Si. Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие **основные задачи:**

1. Исследование структурных и оптических свойств твердых растворов $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$ и $\text{GaP}_{1-x-y}\text{As}_y\text{N}_x$ ($0 \leq x \leq 2\%$) на подложках Si и GaP.

2. Исследование структуры электронных зон твердых растворов $\text{GaP}_{1-x-y}\text{As}_y\text{N}_x$ ($0 \leq x \leq 2\%$) в рамках модели антипересечения зон.

3. Исследование влияния термического отжига на структурные и оптические свойства слоев GaPN/GaP/Si.

4. Разработка конструкции светоизлучающих диодов на основе материалов GaP(As,N) на подложке кремния.

5. Создание светоизлучающих диодов на основе материалов GaP(As,N) на подложках кремния и исследование их параметров.

Научная новизна:

1. Впервые экспериментально показано, что параметр гибридизации, который используется в модели антипересечения зон, описывающей свойства азотосодержащих твердых растворов $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$ ($0 \leq x \leq 2\%$), не является постоянной величиной, а экспоненциально зависит от содержания азота в материале.

2. Показано, что добавление мышьяка в твердый раствор $\text{GaP}_{1-x-y}\text{As}_y\text{N}_x$ компенсирует упругие напряжения в слое эффективнее, по сравнению с добавлением In и созданию $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}_{1-x}\text{N}_x$.

3. Показано, что при высоких концентрациях азота ($1 \leq x \leq 2\%$) в слоях $\text{GaP}_{1-x-y}\text{As}_y\text{N}_x$ оптические переходы происходят только между зоной E₁ и потолком валентной зоны, а при низких концентрациях ($0 \leq x \leq 1\%$) еще и между уровнем NN₁ и потолком валентной зоны

4. Показано, что применение термического отжига слоев GaPN/GaP на подложках кремния приводит к увеличению интенсивности фотолюминесценции в ~2,6 раз при 300К и в ~40 раз при 78К по сравнению с не отожжёнными слоями без изменения энергии перехода.

Практическая значимость:

1. Показано, что дополнительное использование дельта-слоев кремния позволяет увеличить концентрацию легирующей примеси n-типа с $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в слоях GaP на подложках кремния

2. Разработана конструкция и изготовлены светоизлучающие диоды на основе материалов GaP(As,N) на подложке кремния

3. Полученный светодиод демонстрирует электролюминесценцию вплоть до температуры 360К, а также обладает хорошей температурной стабильностью длины волны излучения в диапазоне температур 200-360К.

Объекты и методы исследования:

В диссертации были проведены исследования твердых растворов GaP(As)N и InGaPN, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaP и Si. Также методом молекулярно-пучковой эпитаксии были синтезированы и

исследованы светодиодные p-i-n структуры на основе материалов GaP(As)N на подложках Si.

Для проведения исследований полученных гетероструктур использовались методы высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии, фотолюминесценции, электролюминесценции, комбинационного рассеяния, сканирующей электронной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии. Кроме того, были получены вольт-амперные характеристики светоизлучающих диодов, а также определялась подвижность и концентрация носителей заряда в легированных слоях GaP методом на основе эффекта Холла.

Положения, выносимые на защиту:

1. Параметр гибридизации, который используется в модели антипересечения зон, описывающей свойства азотосодержащих твердых растворов $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$ ($0 \leq x \leq 2\%$), не является постоянной величиной, а экспоненциально зависит от содержания азота в материале.

2. Добавление мышьяка в твердый раствор $\text{GaP}_{1-x-y}\text{As}_y\text{N}_x$ компенсирует упругие напряжения в слое эффективнее, по сравнению с добавлением In и созданию $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}_{1-x}\text{N}_x$.

3. Отжиг в потоке фосфора слоев GaPN/GaP/Si способствует эффективному подавлению безызлучательной рекомбинации без изменения энергии перехода

4. Светодиод на основе полупроводниковых твердых растворов $\text{GaP}_{1-x-y}\text{As}_y\text{N}_x/\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$, выращенный эпитаксиально на подложке кремния демонстрирует электролюминесценцию с длиной волны 645 нм в диапазоне температур 200-360К.

Достоверность результатов, приведенных в диссертации, подтверждается корректным использованием широкого спектра экспериментальных методов и обоснованием полученных результатов. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных статьях, они неоднократно обсуждались на различных конференциях и симпозиумах и получили одобрение ведущих специалистов. Научная новизна технических решений подтверждена двумя патентами РФ на изобретение.

Личный вклад.

Лично автором выполнялись исследования образцов методами фотолюминесценции, методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии, а также измерялись электрофизические параметры (концентрация и подвижность свободных носителей заряда) методом на основе эффекта Холла. Все полученные экспериментальные данные были проанализированы автором с учетом известных литературных данных и сделаны выводы на их основе.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на национальных и международных конференциях и семинарах: 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy - ICCGE-17, August 11-16, 2013 Warsaw, Poland; Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике г. СПб 2012, 2013, 2014, 2015; Всероссийский конгресс молодых ученых, 2013 г. СПб; International School and Conference «Saint-Petersburg OPEN» SPb, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019; 26st International Symposium NANOSTRUCTURES: PHYSICS AND TECHNOLOGY, Minsk, Belarus, June 18–22, 2018

Публикации.

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 14 печатных работах, среди которых 6 научных статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, 6 статьи были опубликованы в зарубежных изданиях, индексируемых в базе WoS, 2 патента на изобретение.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 115 страниц с 60 рисунками и 5 таблицами. Список литературы содержит 97 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено обоснование актуальности работы, сформулированы цели и научная новизна проведенных исследований, обоснована практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору различных подходов для создания эффективных светоизлучающих приборов на кремнии. Описываются преимущества твердых растворов АПВВN.

Далее рассматриваются две модели, описывающие свойства азотосодержащих твердых растворов – модель антипересечения зон [10] и модель сильной связи [9]. В рамках предложенных моделей описаны структурные, оптические и электронные свойства разбавленных нитридов.

Во второй главе описываются технологические подходы и методы исследования, которые были использованы для получения гетероструктур АПВВN с малым содержанием азота на подложках GaP и Si.

Синтез образцов производился методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с плазменной активацией азота. МПЭ позволяет получать гетероструктуры заданной толщины с атомарно-гладкими гетерограницами и с заданным профилем легирования. Для процесса эпитаксии необходимы хорошо очищенные подложки

с атомарно-гладкой поверхностью, поэтому в главе 2 подробно описана проведенная преэпитаксиальная подготовка поверхности кремниевых подложек.

В третьей главе приведены исследования структурных и оптических свойств азотосодержащих твердых растворов на подложках GaP и Si, синтезированных в лаборатории нанoeлектроники Санкт-Петербургского Академического университета им. Ж.И. Алферова методом МПЭ. Рассмотрено влияние параметров эпитаксиального процесса, а именно, температуры подложки и мощности ВЧ генератора атомарного азота на оптические и структурные свойства слоев GaP(As)N.

Была исследована структура электронных зон соединений GaPN в рамках модели антипересечения зон [10]. Была синтезирована и исследована серия образцов, содержащая слои $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$ с различным содержанием азота на подложках GaP. Состав образцов определялся экспериментально по рентгенодифракционным кривым качания, а также по спектрам фотолюминесценции с использованием модели антипересечения зон. При сопоставлении данных было впервые показано, что параметр гибридизации, описывающий взаимодействие локализованного азотного уровня и зоны проводимости твердых растворов $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$, не является постоянной величиной, а экспоненциально зависит от содержания азота в материале (рис. 1).

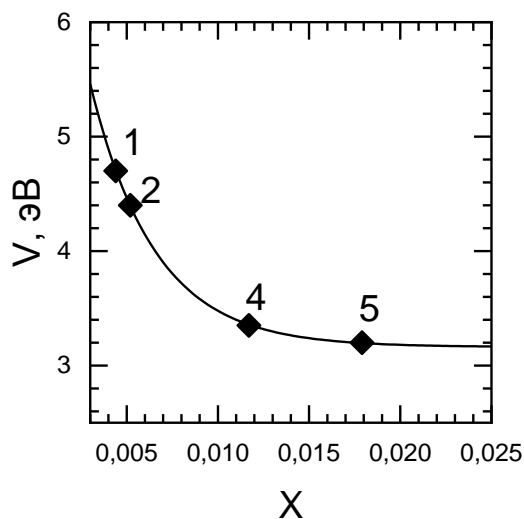


Рисунок 1 -зависимость величины параметра гибридизации от мольной доли азота в $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$

При увеличении концентрации азота в твердых растворах $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x/\text{GaP}$ возникают упругие напряжения. Для компенсации упругих напряжений, а также для варьирования ширины запрещенной зоны и параметров кристаллической

решетки, синтезируют четверные твердые растворы $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{P}_{1-x}\text{N}_x$ или $\text{GaP}_{1-x-y}\text{As}_y\text{N}_x$.

Было проведено сравнение структур с квантовыми ямами InGaPN/GaPN и GaPAsN/GaPN на подложках GaP. Методом фотолюминесценции показано, что внедрение индия приводит к компенсации упругих напряжений, но индий встраивается в подрешетку элементов III группы. Такой способ компенсации хуже, чем компенсация напряжений посредством введения мышьяка, который компенсирует упругие напряжения в подрешетке V группы, созданные азотом. Компенсация напряжений посредством введения мышьяка подавляет образование дефектов.

Были исследованы оптические свойства четверных соединений $\text{GaP}_{1-x-y}\text{As}_y\text{N}_x$ с различным составом. При температуре 80K и ниже происходит расщепление спектра фотолюминесценции на серию эмиссионных линий (рис. 2).

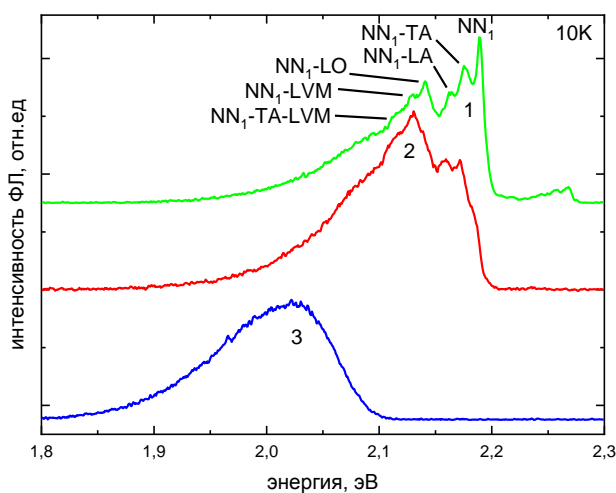


Рисунок 2 – Спектры фотолюминесценции слоев $\text{GaP}_{1-x-y}\text{As}_y\text{N}_x$ (10K)

Наиболее отчетливо эффект проявлялся при исследовании образца с наименьшей мольной долей азота (образец 1). Наиболее интенсивная эмиссионная линия, обозначенная NN_1 , связана с рекомбинацией носителей через локализованное состояние образованное наиболее близкой парой атомов азота. Пики с меньшей энергией, связанные с состоянием NN_1 , являются его фонными репликами. Дополнительно, на спектрах образцов 1 и 2 слева от фонных реплик наблюдается плечо, связанное с оптическими переходами между зоной E. и потолком валентной зоны. Изменение взаимного расположения дна зоны E. относительно уровня пары NN_1 , который находится в четко фиксированном положении, приводит к энергетическому сдвигу ФЛ, связанному с переходами между дном подзоны E. и потолком валентной зоны. В результате форма интегрального спектра ФЛ видоизменяется. Можно отметить различие спектров образцов 1, 2 и 3. Для образцов с малой долей азота (образцы 1 и 2)

энергетический зазор между дном E_c и уровнем NN_1 мал и излучательная рекомбинация идет по обоим каналам. Для образца 3, с более высокой долей азота, энергетический зазор возрастает и спектр ФЛ определяется только оптическими переходами между зоной E_c и потолком валентной зоны.

Далее была подробно рассмотрена особенность встраивания мышьяка в твердый раствор $GaP_{1-x-y}As_yN_x$. Было проведено исследование четверных соединений методом комбинационного (Рамановского) рассеяния с энергией возбуждения 2.33 эВ (рис. 3).

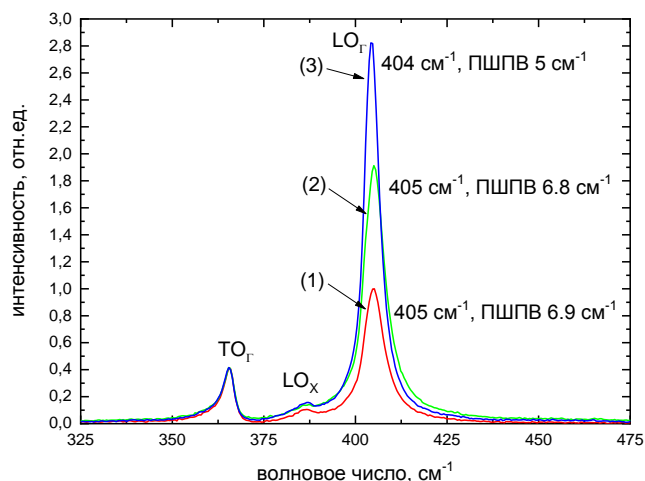


Рисунок 3 - Спектры комбинационного (Рамановского) рассеяния слоев $GaP_{1-x-y}As_yN_x/GaP$

На спектрах доминируют продольная (LO_x) мода на 404 см^{-1} и запрещенная по симметрии поперечная (TO_Γ) мода на 365 см^{-1} . Также на Рамановских спектрах всех образцов присутствует дополнительная фононная линия LO_x (между LO_Γ и TO_Γ) на 386 см^{-1} . Линии были нормированы на запрещенную по симметрии поперечную моду TO_Γ , т.к. она не чувствительна к наличию свободных носителей заряда.

Уменьшение интенсивности дополнительной LO_x и продольной оптической моды LO_x от третьего образца к первому свидетельствует об ослаблении правил сохранения импульса и правил отбора по симметрии, вызванных добавлением азота.

Было оценено отношение интенсивностей продольной оптической моды к дополнительной оптической моде, а также рассогласование кристаллических решеток по данным высокоразрешающей рентгеновской дифракции. Видно, что при уменьшении рассогласования постоянных решеток слоя и подложки и увеличении количества мышьяка в слое, отношение LO_Γ/LO_x увеличивается. Это

свидетельствует о том, что добавление мышьяка компенсирует упругие напряжения, вызванные добавлением азота.

Далее в главе 3 исследуется влияние термического отжига на оптические свойства гетероструктур GaPN/GaP/Si. Применение отжига в процессе роста структуры GaPN/GaP/Si привело к увеличению интенсивности ФЛ при комнатной температуре в 2.6 раза по сравнению со структурой Si/GaP/GaPN, при росте которой отжига не производилось, что свидетельствует об эффективном подавлении безызлучательной рекомбинации. Интересно отметить, что использование отжига не привело к изменению полуширины линии ФЛ или к сдвигу положения максимума фотолюминесценции.

Глава 4 посвящена разработке конструкции и исследованию параметров светоизлучающих p-i-n структур на основе материалов GaP(As,N) на подложке кремния.

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии в лаборатории наноэлектроники Санкт-Петербургского Академического университета получены светодиодные p-i-n структуры на основе материалов GaP(As,N) на подложке Si. Дизайн светоизлучающей структуры и изображение GaPAsN/GaPN активной области, полученное с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), представлены на рисунке 4.

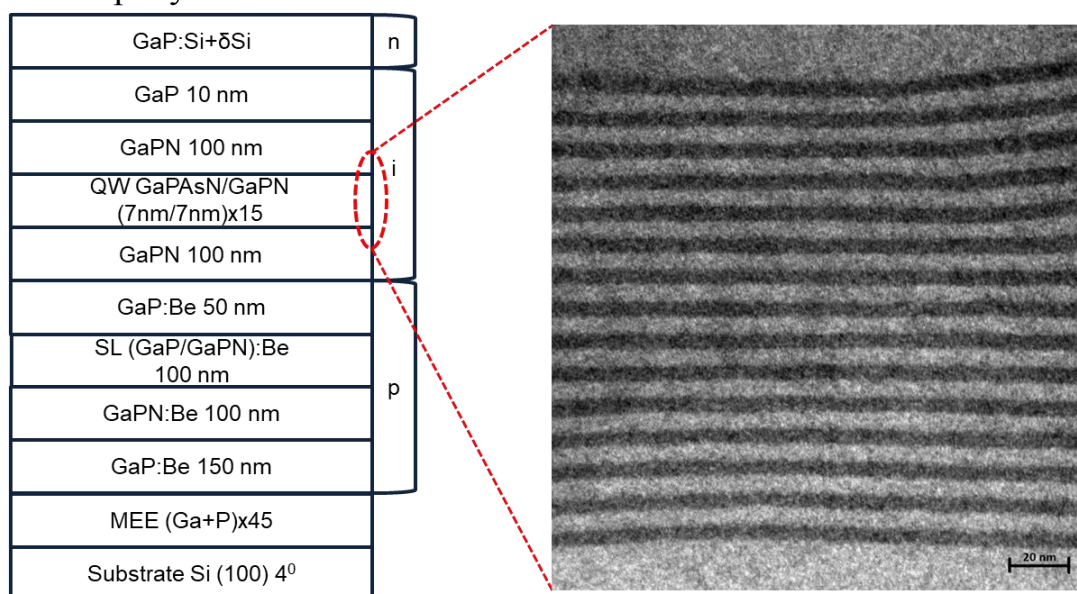


Рисунок 4 – дизайн светоизлучающего диода и ПЭМ изображение активной области

Была получена вольт-амперная характеристика светодиода. Тепловой пробой наступает при -40В, напряжение отсечки ≈ 3.2 В. Высокое напряжение отсечки объясняется падением напряжения на контактах, а также дислокациях, связанных с эпитаксией на кремнии.

Были получены спектры электролюминесценции в широком диапазоне температур (80-360К) (рис. 5).

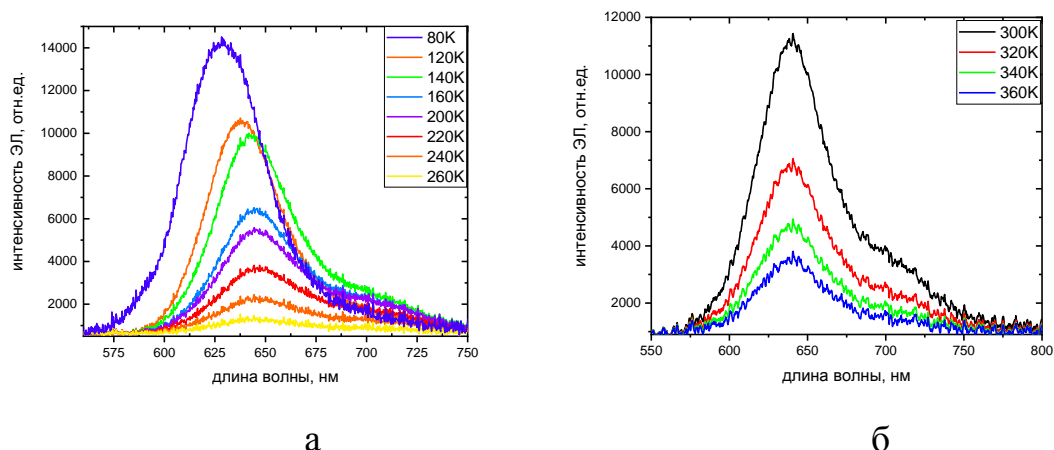


Рисунок 5 – Спектры электролюминесценции при 80-260 К (а) и 300-360К (б)

Светодиод демонстрирует интенсивную электролюминесценцию вплоть до температуры 360К. В диапазоне температур 80-200К наблюдается красное смещение положения пика электролюминесценции, однако при дальнейшем увеличении температуры, значение длины волны остается неизменным.

В литературе такой эффект наблюдался [15] на аналогичных гетероструктурах и объясняется наличием нескольких центров рекомбинации, связанных с неоднородностью слоев.

Заключение содержит основные результаты, полученные в ходе диссертационной работы:

- 1) Была исследована структура электронных зон твердых растворов GaP_N в рамках модели антипересечения зон. Впервые экспериментально показано, что параметр гибридизации, описывающий взаимодействие локализованного азотного уровня и зоны проводимости соединений GaP_{1-x}N_x ($0 \leq x \leq 2\%$), не является постоянной величиной, а экспоненциально зависит от содержания азота в материале.
- 2) Добавление мышьяка в твердый раствор GaP_{1-x-y}As_yN_x компенсирует упругие напряжения в слое эффективнее, по сравнению с добавлением In и созданию In_yGa_{1-y}P_{1-x}N_x
- 3) Показано, что при высоких концентрациях азота ($1 \leq x \leq 2\%$) в слоях GaP_{1-x-y}As_yN_x оптические переходы происходят только между зоной E_c и потолком валентной зоны, а при низких концентрациях ($0 \leq x \leq 1\%$) еще и между уровнем NN₁ и потолком валентной зоны

- 4) Показано, что применение термического отжига слоев GaPN/GaP/Si приводит к увеличению интенсивности фотолюминесценции в $\sim 2,6$ раз при 300К, без изменения энергии перехода
- 5) Разработана конструкция и изготовлены светоизлучающие диоды на основе материалов GaP(As,N) на подложке кремния
- 6) Показано, что дополнительное использование дельта-слоев кремния позволяет увеличить концентрацию легирующей примесей-типа с $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в слоях GaP на подложках кремния
- 7) Полученный светодиод демонстрирует электролюминесценцию вплоть до температуры 360К, а также обладает хорошей температурной стабильностью длины волны излучения в диапазоне температур 200-360К.

Цитируемая литература:

- [1] Oda, S. Nanoscale Silicon Devices / S. Oda, D. K. Ferry. – BocaRaton: CRC Press, 2018. – 300p.
- [2] Abramkin, D.S. Influence of a Low-Temperature GaAs Dislocation Filter on the Perfection of GaAs/Si Layers / D. S. Abramkin, M. O. Petrushkov, E. A. Emel'yanov, M. A. Putyato, B. R. Semyagin, A. V. Vasev, M. Yu. Esin, I. D. Loshkarev, A. K. Gutakovskii, V. V. Preobrazhenskii, T. S. Shamirzaev // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2018. – V.52. – №.6. – P. 181-186
- [3] Bolkhovityanov, Yu. B. Unzipping and movement of Lomer-type edge dislocations in Ge/GeSi/Si (001) heterostructures / Yu. B. Bolkhovityanov, A. S. Deryabin, A. K. Gutakovskii, L. V. Sokolov // Journal of Crystal Growth. – 2018. – V.483 – P. 265-268
- [4] Roelkens, G. III-V/silicon photonics for on-chip and inter-chip optical interconnects / G. Roelkens, L. Liu, D. Liang, R. Jones, A. Fang, B. Koch, J. Bowers // Laser Photonics Rev. – 2010. – V.4 – №.6 – P. 751-779
- [5] Semiconductors: Group IV Elements and III-V Compounds / ed. by Otfried Madelung. – Berlin.: Springer-Verlag. 1991. – 163p.
- [6] Kunert, B. Direct-band-gap Ga(NAsP)-material system pseudomorphically grown on GaP substrate / B. Kunert, K. Volz, J. Koch, W. Stolz // Applied Physics Letters. – 2006. – V.88. – P.182108.
- [7] Dagnelund, D. Optically detected magnetic resonance studies of point defects in quaternary GaNAsP epilayers grown by vapor phase epitaxy / D. Dagnelund, J. Stehr, A.Y. Egorov, W.M. Chen, I.A. Buyanova // Applied Physics Letters. – 2013. – V.102. – P.021910.
- [8] Rolland, A. Design of a lattice-matched III–V–N/Si photovoltaic tandem cell monolithically integrated on silicon substrate / A. Rolland, L. Pedesseau, J. Even, S. Almosni, C. Robert, C. Cornet, J.M. Jancu, J. Benhlal, O. Durand, A.L. Corre, P. Rale,

- L. Lombez, J.F. Guillemoles, E. Tea, S. Laribi // Optical and Quantum Electronics. – 2014. – V.46. – P.1397.
- [9] Robert, C. Study of III-V Nanostructures on GaP for Lasing Emission on Si:manuscript / C. Robert. – Rennes: Photonic. INSA de Rennes, 2013.-206p
- [10] Kent, P. R. C. Theory of electronic structure evolution in GaAsN and GaPN alloys / P. R. C. Kent, Alex Zunger // Phys. Rev.B. - 2001. - V.64. - №.11 - P.115208
- [11] Izadifard, M. Effects of rapid thermal annealing on optical quality of GaNP alloys / M.Izadifard, I.A. Buyanova, J.P. Bergman, W.M. Chen, A. Utsumi, Y. Furukawa, A. Wakahara, H. Yonezu // IEE Proceedings: Optoelectronics. – 2004. – V.151. – I.5. – P.335
- [12] Furukawa, Y. Control of N Content of GaPN Grown by Molecular Beam Epitaxy and Growth of GaPN Lattice Matched to Si(100) Substrate / Y. Furukawa, H. Yonezu, K. Ojima, K. Samonji, Y. Fujimoto, K. Momose, K. Aiki // Japanese Journal of Applied Physics. – 2002. – V.141. – P.528.
- [13] Bank, S.R.Recent Progression 1.55- μm Dilute-Nitride Lasers / S. R. Bank, H. Bae, L. L. Goddard, H. B. Yuen, M. A. Wistey, R. Kudrawiec, J.S. Harris // iee journal of quantum electronics. – 2007. - V. 43. - №.9. – p. 773-785
- [14] Tang D., Investigation of dilute-nitride alloys of GaAsN_x ($0.01 < x < 0.04$) grown by MBE on GaAs (001) substrates for photovoltaic solar cell devices / D. Tang, G. K. Vijaya, A. Mehrotra, A. Freunlich, D. J. Smith // Journal of Vacuum Science&Technology B. – 2016. – V.34. – №.1. – p. 011210
- [15] Егоров, А.Ю. Оптические свойства четверных полупроводниковых твердых растворов $\text{GaN}_x\text{As}_y\text{P}_{1-x-y}$ / А.Ю. Егоров, Н.В. Крыжановская, Е.В. Пирогов, М.М. Павлов // ФТП. – 2010.-Т.44. – ВЫП. 7. – с.886-890

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

- [A1] Бабичев, А.В. Сверхширокий спектр электролюминесценции светодиодных гетероструктур на основе полупроводниковых твердых растворов GaPAsN/ А.В. Бабичев, А.А. Лазаренко, Е.В.Никитина, Е.В.Пирогов, М.С.Соболев, А.Ю. Егоров // Физика и Техника Полупроводников. – 2014.-Т.48. – ВЫП. 4. – с.518-522
- [A2] Лазаренко, А.А., Молекулярно-пучковая эпитаксия азотосодержащих твердых растворов GaPN, GaPAsN и InGaPN/ А.А.Лазаренко, Е.В.Никитина, Е.В.Пирогов, М.С.Соболев, А.Ю. Егоров //Физика и Техника Полупроводников. – 2014.-Т.48. – ВЫП. 3. – с.407-411
- [A3] Лазаренко, А.А., Фотолюминесценция гетероструктур со слоями $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$ и $\text{GaP}_{1-x-y}\text{N}_x\text{As}_y$, выращенных на подложках GaP и Si методом молекулярно-пучковой эпитаксии / А.А.Лазаренко, Е.В.Никитина, М.С.Соболев, Е.В.Пирогов,

Д.В.Денисов, А.Ю.Егоров // Физика и Техника Полупроводников. – 2015.-Т.49. – ВЫП. 4. – с.489-493

[A4] Соболев, М.С., Молекулярно-пучковая эпитаксия GaP на подложке Si / М.С.Соболев, **А.А.Лазаренко**, Е.В.Никитина, Е.В.Пирогов, А.С.Гудовских, А.Ю.Егоров // Физика и Техника Полупроводников. – 2015.-Т.49. – ВЫП. 4. – с.569-572

[A5] Никитина Е.В, Гетероструктуры GaAs/InGaAsN для многопереходных солнечных элементов / Е.В.Никитина, А.С.Гудовских, **А.А. Лазаренко**, Е.В.Пирогов, М.С.Соболев, К.С.Зеленцов, И.А.Морозов, А.Ю.Егоров // Физика и Техника Полупроводников. – 2016.-Т.50. – ВЫП. 5. – с.663-667

[A6] Крыжановская, Н.В., Исследование структурных и оптических свойств слоев GaP(N), синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках Si (100) 4° / Н.В. Крыжановская, Ю.С. Полубавкина, В.Н. Неведомский, Е.В. Никитина, **А.А. Лазаренко**, А.Ю.Егоров, М.В. Максимов, Э.И. Моисеев, А.Е. Жуков // Физика и Техника Полупроводников. – 2017. - Т.51. – ВЫП. 2. – с.276-280

Патенты на изобретение:

[A7] Никитина Е.В., **Лазаренко А.А.**, Пирогов Е.В., Соболев М.С. Способ изготовления полупроводникового буферного слоя GaP на подложке кремния методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Патент №RU2015151111А. – 2015.

[A8] Никитина Е.В., **Лазаренко А.А.**, Пирогов Е.В., Соболев М.С. Гетероструктура GaPAsN светодиода и фотоприемника на подложке Si и способ ее изготовления. Патент № RU2650606С2. – 2016.

Статьи, опубликованные в зарубежных изданиях, включённых в системы цитирования Scopus и Web Of Science:

[A9] **Lazarenko, A.A.**, Raman measurements of dilute nitride alloys GaP(As)N grown on GaP substrates / A Lazarenko, E Pirogov, M Sobolev, A Bukatin, E Nikitina // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V.741. – P.012005

[A10] **Lazarenko, A.A.**, Preparation of a silicon surface for subsequent growth of dilute nitride alloys by molecular-beam epitaxy / A.A. Lazarenko, T.N. Berezovskaya, D.V. Denisov, M.S. Sobolev, E.V. Pirogov, E.V. Nikitina // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V.917. – P.032003

[A11] **Lazarenko, A.A.**, Epitaxial growth and investigation of GaP/GaP(As)N heterostructures on Si (100) 4° substrates / A.A. Lazarenko, M.S. Sobolev, E.V. Pirogov, N.V. Kryzhanovskaya, E.V. Nikitina // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V.917. – P.032044

[A12] Baranov, A.I., Defect properties of InGaAsN layers grown as sub-monolayer digital alloys by molecular beam epitaxy / A.I. Baranov, A.S. Gudovskikh, D.A. Kudryashov, **А.А. Lazarenko**, I.A. Morozov, A.M. Mozharov, E.V. Nikitina, E.V.

Pirogov, M.S. Sobolev, K.S. Zelentsov, A.Yu. Egorov, A. Darga, S. LeGall, J.-P. Kleider // Journal of Applied Physics. – 2018. – V.123. – P.161418

[A13] Sobolev, M.S., Heteroepitaxy of GaP Nucleation Layers on Si by Molecular Beam Epitaxy / M.S. Sobolev, **A.A. Lazarenko**, A.M. Mizerov, E.V. Nikitina, E.V. Pirogov, S.N. Timoshnev, A.D. Bouravleuv // Semiconductors. – 2018. - V.52. – I.16. – P.161418

[A14] **Lazarenko, A.A.**, Design and investigation of GaPAsN/Si light-emitting diode / A. Lazarenko, A. Gudovskikh, A. Baranov, M. Sobolev, E. Pirogov, E. Nikitina // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V.1410. – P.012091