

ОТЗЫВ

официального оппонента Одноблюдова Максима Анатольевича на диссертацию Соболева Максима Сергеевича на тему «ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ УПРУГО-НАПРЯЖЕННЫХ, УПРУГОКОМПЕНСИРОВАННЫХ И МЕТАМОРФНЫХ СЛОЕВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ АЗВ5 И АЗВ5-N НА ПОВЕРХНОСТИ GaAs, GaP и Si», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 - «Приборы и методы экспериментальной физики».

Представленная к защите диссертация Соболева М.С. выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском национальном исследовательском Академическом университете Российской академии наук» и посвящена исследованию физических аспектов гетероэпитаксии твердых растворов АЗВ5 и АЗВ5-N на поверхности GaAs, GaP и Si методом молекулярно-пучковой эпитаксии, а также исследованию физических свойств упругонапряженных, упругокомпенсированных и метаморфных слоев твердых растворов АЗВ5 и АЗВ5-N и приборов на их основе.

Актуальность темы

Диссертационная работа Соболева М.С. направлена на исследование и разработку новых методов создания, конструкций и физических свойств гетероструктур приборов микро- и оптоэлектроники как на основе традиционных твердых растворов АЗВ5, так и на основе новых азотосодержащих твердых растворов АЗВ5-N с малой мольной долей азота методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

Достоверность и новизна основных выводов и результатов диссертации

В диссертации Соболева М.С. проведено экспериментальное

и теоретическое исследование, позволившее разработать: транзисторы миллиметрового диапазона на поверхности арсенида галлия с улучшенными мощностными характеристиками; фотоэлектрические преобразователи на основе периодических гетероструктур InAs/GaAsN с внешней квантовой эффективностью более 75% с шириной запрещенной зоны 1эВ; светоизлучающие диодные гетероструктуры на подложке кремния для видимого диапазона длин волн 647-654 нм; многопереходные солнечные элементы на основе упругонапряженной гетероструктуры GaPNAs на подложке кремния. Особое внимание в работе уделено методам эпитаксиального выращивания гетероструктур твердых растворов Al_{0.5}B_{0.5} и Al_{0.5}B_{0.5}-N на поверхности кремния, поскольку направлена на решение существующей проблемы интеграции технологии соединений Al_{0.5}B_{0.5} и кремниевой технологии, и создания оптоэлектронных приборов на основе кремния. Указанные проблемы были решены предложенными в рассматриваемой работе оригинальными решениями, а достоверность выводов подтверждается хорошим согласованием результатов теоретического исследования и экспериментальных данных, полученных в диссертации, а также данными, описанными в литературе.

Научная новизна диссертации заключается в том, что лично автором, или при его ведущей роли:

- Впервые показано, что используя наногетероструктуры оригинальной конструкции метаморфного буферного слоя можно добиться подавления проникновения дислокаций в активную область наногетероструктуры транзистора с высокой подвижностью электронов и подавления процесса развития микрорельефа поверхности во время процесса эпитаксии, приводящее к уменьшению шероховатости поверхности и гетерограниц наногетероструктуры, что снижает рассеяние носителей заряда на шероховатостях гетерограницы и способствует повышению подвижности носителей заряда двумерного электронного газа;

- Впервые методом «цифровой» эпитаксии получены транзисторы с высокой подвижностью электронов для миллиметрового диапазона на поверхности GaAs с метаморфным буферным слоем оригинальной конструкции с высокими значениями концентрации, более $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, и подвижности носителей заряда, более $8800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, в проводящем канале;
- Впервые продемонстрировано, что спектральный отклик гетероструктур твердых растворов InGaAsN и GaPAsN с p-n переходом, зафиксированный при комнатной температуре, свидетельствует о многозонном поглощении оптического излучения в таких материалах;
- Впервые продемонстрирована принципиальная возможность создания фотоэлектрического преобразователя с внешней квантовой эффективностью более 75% на основе периодических гетероструктур InAs/GaAsN, с пространственным разделением слоев, содержащих In и N, с шириной запрещенной зоны 1эВ и параметром кристаллической решетки 5.653 \AA ;
- Впервые продемонстрированы светоизлучающие диоды на основе упругонапряженной гетероструктуры GaPN(As) на подложке кремния с длиной волны излучения 647-654 нм и полушириной спектральной полосы 100 нм при комнатной температуре измерения.
- Впервые получен трехпереходный солнечный элемент на основе упругонапряженной гетероструктуры GaPNAs на подложке кремния со спектральной чувствительности в диапазоне 350-1200 нм и повышенным напряжением холостого хода 2.2 В.

Практическая значимость работы состоит в разработке нового

- транзистора с высокой подвижностью электронов для миллиметрового диапазона на подложке GaAs с метаморфным буферным слоем оригинальной конструкции с концентрацией носителей заряда в канале не менее $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и подвижностью носителей заряда $8800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$;

- фотоэлектрического преобразователя с внешней квантовой эффективностью более 75% на основе периодических гетероструктур InAs/GaAsN, с пространственным разделением слоев, содержащих In и N, с шириной запрещенной зоны 1эВ и параметром кристаллической решетки 5.653 Å;
- светоизлучающие диодные гетероструктуры видимого спектрального диапазона (647-654 нм) на подложке кремния;
- трехпереходного солнечного элемента на основе упругонапряженной гетероструктуры GaPNAs на подложке кремния со спектральной чувствительности в диапазоне 350-1200 нм и повышенным напряжением холостого хода 2.2 В.

Оценка содержания диссертации

В диссертации материал представлен логично, последовательно, с глубоким пониманием предмета исследования, что свидетельствует о высокой научной квалификации автора. Объем диссертации 169 страниц. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. По мнению оппонента, полученные результаты являются новыми и расширяют возможности применения предложенных автором наногетероструктур для значительного улучшения характеристик приборов микро- и оптоэлектроники в научных исследованиях и в промышленности. Библиография содержит 72 наименования. Диссертация аккуратно оформлена. Основное содержание диссертации опубликовано в 9 рецензируемых отечественных журналах, рекомендованных ВАК, патенте РФ, а также прошло апробацию на Всероссийских и международных конференциях.

Замечания по диссертации

При общей высокой оценке работы, следует отметить некоторые её недостатки, как по форме, так и по содержанию:

1. В диссертационной работе не приводится явных отличий предложенного метода формирования квантоворазмерных гетероструктур, так называемого цифрового (“digital alloying”), от известного метода формирования твердого слоя посредством выращивания сверхрешеток.

2. В работе не описан метод формирования и компонентный состав металлических контактных слоев использованных при создании многопереходных солнечных элементов на основе полупроводниковых соединений GaPN.

Заключение

Приведенные выше замечания, а также встречающиеся в тексте описки и неточности, тем не менее, не снижают ценности представленных в работе результатов. Автореферат полно отражает содержание диссертации. В целом, диссертация Соболева Максима Сергеевича представляет собой законченное исследование на актуальную тему. Она решает важную научную и практическую задачу, имеющую народнохозяйственное значение, и полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики, а её автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Исполнительный директор

Объединенный научно-технологический институт,

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,

кандидат физико-математических наук,

г. Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29,

тел. +7(812) 552-98-29, onti@onti.spbstu.ru



М.А. Одноблюдов

Подпись *М.А. Одноблюдова*
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист
по кадрам *В.С. Шестеркин*
«01» декабря 2015 г.