

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе Университета ИТМО

В.О. Никифоров

« 1 » ~~сентября~~ 2015 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации - Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики на диссертацию **Соболева Максима Сергеевича** на тему **«Гетероэпитаксия упругонапряженных, упругокомпенсированных и метаморфных слоев твердых растворов A^3B^5 и A^3B^5-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.

Актуальность темы диссертации

Прогресс в области микроэлектроники и современного оптоэлектронного приборостроения в настоящее время во многом зависит от технологии получения новых композитных материалов на основе как традиционных полупроводниковых соединений группы A^3B^5 , так и их твердых растворов, включая твердые растворы с участием нитридов элементов третьей группы. Особую значимость здесь имеет гетероэпитаксия упругонапряженных, упругокомпенсированных и метаморфных слоев твердых растворов A^3B^5 и A^3B^5-N на поверхности арсенида галлия, фосфида галлия и кремния. Разработка технологий молекулярно-пучковой эпитаксии таких структур, исследование их физических свойств и создание на их основе пилотных образцов электронных и оптоэлектронных компонентов с существенно улучшенными технико-

эксплуатационными характеристиками представляет собой актуальную проблему комплексного характера. Существенно значимые аспекты этой проблемы исследованы и решены в диссертационной работе Соболева М.С.

Новизна полученных результатов

К числу научных результатов, представленных в диссертации и имеющих признаки новизны, можно отнести:

- Впервые установлено, что образование дислокаций проникновения в активную область и формирование микрорельефа на границах слоев наногетероструктуры в процессе эпитаксии можно подавить метаморфными буферными слоями, что обеспечивает существенное увеличение подвижности носителей заряда в двумерном электронном газе;

Впервые предложен метод «цифровой» эпитаксии на подложках арсенида галлия с буферным метаморфным слоем и на этой технологической основе созданы транзисторы миллиметрового диапазона с подвижностью свободных носителей заряда до $8800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$;

Впервые подтверждено экспериментально, что в оптических спектрах квантовой эффективности для гетероструктур с участием азотосодержащих твердых растворов A^3B^5 имеет место трансформация (расщепление) зоны проводимости, соответствующая двухзонной модели (Virtual Crystal Approximation (VCA));

Впервые исследованы фотоэлектрические свойства периодических гетероструктур InAs/GaAsN с пространственным разделением слоев, использующих In и N, и показана возможность реализации фотоэлектрического преобразователя с внешней квантовой эффективностью более 75%;

Впервые исследована возможность создания и созданы светоизлучающие диоды на основе упругонапряженной гетероструктуры $\text{GaPN}(\text{As})$ на подложке кремния с длиной волны излучения 647-654 нм и полушириной спектральной полосы 100 нм при комнатной температуре измерения;

Впервые на основе упругонапряженной гетероструктуры GaPNAs/Si получен трехпереходный солнечный элемент со спектром чувствительности при длинах волн 350-1200 нм и напряжением холостого хода 2.2 В.

Значимость научных и практических результатов работы

Все научные результаты по разработке технологии гетероэпитаксии упругонапряженных, упругокомпенсированных и метаморфных слоев твердых растворов A^3B^5 и A^3B^5-N на поверхности GaAs, GaP и Si, а также данные исследований их структурных и физических свойств (электрофизических и фотоэлектрических), включая использованные для этого во многом уникальные методы и средства, имеют исключительную научную значимость и во многом опережают зарубежные исследования. В практическом отношении существенную значимость по структурно-конструктивным решениям и технологической реализации имеют разработанные и исследованные образцы реальных элементов оптоэлектроники и микроэлектроники в т.ч.:

- многопереходные фотоэлектрические модули со спектральной чувствительности в диапазоне 350-1200 нм и повышенным напряжением холостого хода, до 2.2 В;
- фотоэлектрические преобразователи на основе периодических гетероструктур InAs/GaAsN с внешней квантовой эффективностью более 75% с шириной запрещенной зоны 1 эВ и параметром кристаллической решетки 5.653 Å;
- светоизлучающие диодные гетероструктуры на подложке кремния для видимого диапазона длин волн 647-654 нм;
- транзисторы миллиметрового диапазона на поверхности арсенида галлия со специальным метаморфным буферным слоем, имеющие подвижность свободных носителей до $8800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при их концентрации в канале $3.15 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$

Достоверность результатов

Все выводы и результаты диссертационной работы в полной мере аргументированы и подтверждены как лабораторными исследованиями, так и практическими данными по разработкам технологий гетероэпитаксии упругонапряженных, упругокомпенсированных и метаморфных слоев твердых растворов A^3B^5 и A^3B^5-N на поверхности GaAs, GaP и Si, а также представляемыми образцами реальных микроэлектронных и оптоэлектронных элементов. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на восьми российских и международных конференциях и опубликованы в восемнадцати научных работах, девять из которых – в рецензируемых журналах.

Рекомендации по использованию полученных результатов

Научные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе Соболева М.С., могут быть рекомендованы в научных исследованиях и разработках в Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета РАН, ФТИ им.А.Ф. Иоффе РАН, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб Политехнического университета Петра Великого, ОАО «ЦНИИ «Электрон», ОАО «НПО «ОРИОН», Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», а также других научно-исследовательских и проектно-технологических организациях.

Реализованные технологии, а также методы и средства исследований и фундаментальные научные результаты также следует рекомендовать для учебных и исследовательских целей в СПбГЭТУ «ЛЭТИ», НИУ «ИТМО», НИУ «МИЭТ» при подготовке магистров и аспирантов в области наноэлектроники и оптоэлектроники.

В качестве замечаний (помимо замечаний редакционно-технического характера, в частности, нет обозначений по осям координат на рис. 1.1, 1.9, 3.6; грамматические огрехи или опечатки), **необходимо отметить:**

1. Работа по своему содержанию и направленности выполненных исследований и разработок в большей степени могла бы соответствовать специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.
2. Из материалов диссертации остается непонятным, как влияет азот на трансформацию зонной структуры твердых растворов A^3B^5-N . При малом мольном содержании азота трансформация зоны проводимости твердых растворов A^3B^5-N формально описывается в рамках упомянутой в работе двухзонной модели (Virtual Crystal Approximation (VCA)). Однако в диссертации не приводятся никаких данных по модификации валентной зоны твердых растворов A^3B^5-N .

Приведенные замечания не затрагивают сути защищаемых научных положений и не влияют на общую положительную оценку работы, которая представляет собой законченное научное исследование приоритетного характера, содержащее решение актуальных задач в области приборостроения и методов экспериментальной физики и характеризующееся существенными достижениями в технологии полупроводниковых материалов и структур, разработке методов и средств исследования их свойств и создании элементов микроэлектроники и оптоэлектроники с улучшенными технико-эксплуатационными характеристиками.

