

**Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки  
Институт Аналитического Приборостроения  
Российской Академии Наук**

---

на правах рукописи

**Буравлев Алексей Дмитриевич**

**МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВАЯ ЭПИТАКСИЯ И СВОЙСТВА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАГНИТНЫХ  
НАНОСТРУКТУР**

специальности:

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики  
01.04.10 - физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2014

**Работа выполнена** в ФГБУН ИАП РАН и ФГБУНФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН.

**Научный консультант:**

доктор физико-математических наук  
Цырлин Георгий Эрнстович

**Официальные оппоненты:**

директор ИФМ РАН, зам. Председателя Президиума ННЦ РАН  
доктор физико-математических наук, профессор  
Красильник Захарий Фишелевич

зав. кафедрой «физики полупроводников и наноэлектроники»  
радиофизического факультета СПбГПУ  
доктор физико-математических наук, профессор  
Фирсов Дмитрий Анатольевич

главный научный сотрудник лаб. «неравновесных  
полупроводниковых систем» ИФП СО РАН  
доктор физико-математических наук  
Якимов Андрей Иннокентьевич

**Ведущая организация:** ФГБОУВПО «Балтийский государственный  
технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова»

**Защита состоится** «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г. в часов на заседании  
диссертационного совета Д002.034.01 при ФГБУН ИАП РАН по  
адресу 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных 31-33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАП РАН по  
адресу: 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., д.26. Отзывы о  
диссертации в двух экземплярах, заверенные печатью, просим  
направлять по вышеуказанному адресу ученому секретарю  
специализированного совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.034.01,

доктор физико-математических наук

А.Л. Буляница

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Изучение магнитных явлений или, что более точно, магнитных материалов, по-видимому, началось несколько тысячелетий назад. Свойство природного магнита – магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) притягивать железо было давно известно как в Китае, так и в древней Греции. Изобретение компаса произвело настоящий переворот в мореплавании. По своей значимости оно ничуть не уступает открытиям, совершенным в течение двух последних столетий, которые полностью изменили мир. Всплеск так называемых информационных технологий является прямым следствием создания устройств для обработки, хранения и передачи данных. Сейчас уже достаточно сложно представить себе повседневную жизнь без компьютеров, мобильной связи, интернета и многих других электронных устройств и технологий, которые стали необходимым атрибутом не только для профессионального, но и социального аспекта человеческого бытия.

Постоянный рост объема информации, как уже было отмечено выше, предъявляет серьезные требования не только к технологиям, используемым для хранения, но и ее обработки. Наблюдается неослабевающая потребность в миниатюризации устройств при увеличении их вычислительных мощностей, объема хранимой и обрабатываемой информации, ее защите, а также уменьшении энергопотребления подобных устройств.

Стремительное развитие полупроводниковых технологий, в том числе, и нанотехнологий, до сих пор подчиняется широко

известному закону Мура [Moore,1965], предсказывавшему экспоненциальный рост числа элементов на одном чипе. Размер электронных элементов неуклонно снижается и уже достигает нанометрового диапазона. Тем не менее, очевидно, что рост числа элементов ограничен физическим пределом, связанным с размером самих атомов или молекул. Поэтому технологии, основанные на их самоорганизации, приобретают все более важное значение. Исследования таких квазиодномерных и квазинульмерных объектов, как самоупорядоченные полупроводниковые нитевидные нанокристаллы (ННК) и квантовые точки (КТ), связаны, в первую очередь, с их уникальными физическими свойствами и потенциальной возможностью их использования для создания приборов электроники.

Работа современных приборов твердотельной полупроводниковой электроники базируется, в основном, на управлении носителями заряда. Степени свободы связанные с их спином практически не используется. Идеи по созданию спиновой электроники – спинтроники, активно обсуждаются и разрабатываются с 80-х годов прошлого века. Мощным толчком их развития послужило открытие в 1988 году эффекта гигантского магнетосопротивления [Baibich,1988; Vinasch,1989], за которое в 2007 году А. Ферту и П. Грюнбергу была присуждена Нобелевская премия [Ферт,2008; Грюнберг,2008]. На основе данного эффекта был создан целый ряд магнитных датчиков, используемых в качестве головок для чтения и записи жестких дисков, а также магниторезистивная оперативная память (MRAM - magnetoresistive random-access memory) обладающая важным преимуществом -

энергонезависимостью, т.е. способностью сохранять информацию даже при отсутствии питания. Подобные устройства основаны на использовании магнитных металлов, при этом полупроводниковая спинтроника обладает рядом существенных преимуществ [Кусраев,2010]. К их числу, безусловно, можно отнести то, что технологии их получения полностью совместимы с существующими технологиями полупроводниковой микроэлектроники. С другой стороны, многие эффекты, связанные, в первую очередь, со временами спиновой когерентности, в полупроводниках проявляются на порядок сильнее, что является одним из необходимых условий для создания, например, спиновых транзисторов [Datta,1990]. Кроме того, поскольку свойства подобных соединений зависят от концентрации свободных носителей заряда, появляется возможность прямого управления их магнитными свойствами путем приложения внешнего электрического поля. Комбинация достоинств полупроводников и магнитных материалов делает возможным интегрирование элементов для вычислительных операций, сохранения и передачи данных на одном чипе, при этом обладающем высоким быстродействием.

Одной из главных проблем современной полупроводниковой спинтроники является поиск новых материалов, которые бы обладали свойствами ферромагнетиков и полупроводников. При этом особое внимание уделяется как гибридным системам типа ферромагнитный металл-полупроводник [Zutic,2004; Захарченя,2005; Кусраев,2010], так и разбавленным магнитным полупроводникам (РМП) [Dietl,2013].

Гибридные системы типа ферромагнетик-полупроводник, обладают как рядом существенных плюсов, так и недостатков. К достоинствам можно отнести потенциальную возможность прямой инжекции спинов из ферромагнетика в полупроводник, считывания намагниченности и управления магнетизмом с помощью полупроводника, широкий диапазон материалов, которые могут быть использованы для создания таких гибридов, а к недостаткам, например, большую величину контактного сопротивления между ферромагнетиком и полупроводником [Захарченя,2005; Korenev,2012].

В свою очередь, РМП соединения благодаря своим свойствам также вызывают повышенный интерес. Известно, что в большинстве полупроводники являются немагнитными материалами. Однако было обнаружено, что при легировании даже относительно небольшим количеством магнитных атомов они могут проявлять ферромагнитные свойства. Именно такие соединения и получили название полумагнитных полупроводников, или разбавленных магнитных полупроводников. Одним из наиболее распространённых элементов, который используется для легирования, является Mn, обладающий пятью неспаренными электронами в  $d$ - оболочке. Работы по синтезу подобных веществ на основе  $A_2B_6$  полупроводников стали вестись еще с конца 70-х годов прошлого века [Ляпилин,1985; Furdyna,1988; Цидильковский,1990]. В свою очередь, впервые о синтезе магнитных тонких пленок на основе  $(In,Mn)As$  было сообщено лишь к концу 80-х годов прошлого века [Munekata,1989]. Следует отметить, что это стало возможным благодаря развитию эпитаксиальных технологий и, в первую

очередь, молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Немного позднее, был синтезирован РМП, продемонстрировавший ферромагнитные свойства на основе  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  [Ohno,1996]. Этот полупроводник на сегодняшний день стал, по-сути, модельным и наиболее изученным среди подобных соединений. Было показано, что в зависимости от уровня легирования и расстояния между атомами легирующей примеси РМП могут проявлять различные типы магнитного упорядочения. Равновесная растворимость Mn в  $\text{A}_3\text{B}_5$  полупроводниках крайне низка. Поэтому для синтеза РМП соединений на основе  $(\text{A}_3,\text{Mn})\text{B}_5$  используют, в первую очередь, неравновесные методы синтеза, к которым относится и метод молекулярно-пучковой эпитаксии. При этом обычно для МПЭ синтеза РМП на основе  $(\text{A}_3,\text{Mn})\text{B}_5$  используют низкотемпературные режимы роста [Munekata,1989; Ohno,1996; Dietl,2013]. Это связано с тем, что при понижении температуры роста до 200 - 300°C удастся, с одной стороны, превысить предел равновесной растворимости Mn, а с другой - избежать нежелательной сегрегации вторичных фаз таких, как, например,  $\text{MnAs}$  или  $\text{GaMn}_3$ . На настоящий момент, максимальная температура ферромагнитного упорядочения (температура Кюри) РМП соединений типа  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  еще далека от комнатной  $\sim 188\text{K}$  [Nёмес,2013]. Следует отметить, что все существующие модели, описывающие ферромагнитные свойства РМП, базируются на обменном взаимодействии газа свободных носителей (дырок в случае  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ ) и примесных ионов. Тем не менее, до сих пор не предложено универсальной модели, которая смогла адекватно описать процессы магнитного упорядочения в  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ , а также других  $(\text{A}_3,\text{Mn})\text{B}_5$  РМП. Фундаментальный

вопрос об истинной природе магнетизма, а точнее о механизме возникновения ферромагнитных свойств РМП типа  $(\text{A}_3,\text{Mn})\text{B}_5$ , несмотря на его важность, в том числе, и с точки зрения технологических аспектов создания подобных соединений, до сих пор остается открытым.

При исследовании тонких пленок на основе  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  соединений было обнаружено, что одним из способов повышения температуры Кюри является уменьшение их толщины [Mathieu,2003]. Поэтому одним из возможных путей повышения температуры Кюри, является переход к синтезу низкоразмерных структур на основе РМП соединений. Кроме того, при синтезе наноструктур может увеличиваться растворимость переходных металлов (например, Mn) и уменьшаться вероятность сегрегации вторичных фаз [Моргунов,2009]. Технологические методики, разработанные для синтеза наноструктур таких, как ННК и КТ, позволяют контролировать их геометрические размеры, форму и расположение, открывая, тем самым, широкие перспективы для создания систем с заранее запрограммированными магнитными свойствами. Таким образом, магнитные наноструктуры представляют большой интерес не только для изучения фундаментальных свойств систем с пониженной размерностью, но и для создания принципиально новых приборов спинтроники.

Вышесказанное определяет актуальность темы настоящей работы, которая была направлена на разработку технологических способов формирования нитевидных нанокристаллов на основе  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  и MnP соединений, так и квантовых точек на основе

(In,Mn)As с использованием МПЭ и детальное изучение их физических свойств.

**Цель данной диссертационной работы** состояла в разработке, как технологических процессов эпитаксиального роста, так и исследовании свойств полупроводниковых магнитных наноструктурах, как Ge, MnP, Mn<sub>2</sub>P, (Ga,Mn)As нитевидные нанокристаллы и (In,Mn)As квантовые точки.

Для достижения поставленной цели, в ходе работы решались следующие **основные задачи**:

- исследование процессов формирования нитевидных нанокристаллов на основе Ge и MnP с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии;
- исследование структурных, морфологических и магнитных свойств образцов с нитевидными нанокристаллами на основе Ge и MnP;
- разработка технологии выращивания (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов с использованием Mn в качестве катализатора роста;
- определение оптимальных параметров формирования (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов;
- исследование структурных, магнитных, оптических и электрофизических свойств (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов;
- разработка технологии выращивания (In,Mn)As квантовых точек, в том числе, многослойных массивов квантовых точек;

- исследование структурных и оптических свойств (In,Mn)As квантовых точек.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Ge, Mn<sub>2</sub>P и MnP нитевидные нанокристаллы могут быть синтезированы с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии.
2. Источником атомов In для роста MnP/InP гибридных нанокристаллов, демонстрирующих ферромагнитное упорядочение до температур порядка 310К, может служить подложка InP, на поверхности которой осуществляется их непосредственный синтез.
3. Использование в качестве катализатора роста Mn позволяет синтезировать (Ga,Mn)As нитевидные нанокристаллы, проявляющие ферромагнитные свойства до 70 К, с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии при условии стабилизации по элементам металлической группы.
4. Возбуждение механических колебаний одиночных нитевидных нано-кристаллов и их непосредственная регистрация с помощью растрового электронного микроскопа позволяет определить значение модуля упругости исследуемых нитевидных нанокристаллов.
5. Селективное легирование атомами Mn центральных частей полупроводниковых квантовых точек с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии позволяет получить структуры с высоким кристаллическим качеством.

**Научная новизна работы** состоит в том, что в ней:

- впервые показано, что с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии при использовании крекингового источника для получения потока димеров фосфора могут быть синтезированы Ge,  $Mn_2P$ ,  $MnP$ , а также гибридные  $MnP/InP$  нитевидные нанокристаллы;
- обнаружен принципиально новый метод формирования ННК, при котором источником материала для их роста служит сама подложка;
- продемонстрировано, что полученные на основе этого метода образцы с гибридными  $MnP/InP$  нитевидными нанокристаллами проявляют ферромагнитные свойства до температур порядка 310К;
- впервые показано, что использование в качестве катализатора роста Mn позволяет синтезировать нитевидные нанокристаллы на основе разбавленных магнитных полупроводников типа  $(Ga,Mn)As$  с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии при условии стабилизации по элементам металлической группы;
- впервые продемонстрировано, что рост  $(Ga,Mn)As$  нитевидных нанокристаллов при повышенных температурах позволяет избежать сегрегации вторичных фаз на боковых стенках и внутри нитевидных нанокристаллов, приводя к встраиванию Mn на катионные позиции в решетке;
- обнаружено, что  $(Ga,Mn)As$  нитевидные нанокристаллы могут проявлять ферромагнитное упорядочение вплоть до 70К;

- показано, что возбуждение механических колебаний одиночных нитевидных нанокристаллов и их непосредственная регистрация с помощью растрового электронного микроскопа позволяет определить значение модуля упругости исследуемых нитевидных нанокристаллов;
- впервые предложен и реализован метод эпитаксиального выращивания магнитных квантовых точек, основанный на селективном легировании атомами Mn только их центральных частей, который позволил получить структуры с высоким кристаллическим качеством;
- показано, что квантовые точки, синтезированные с помощью этого метода, проявляют поведение поляризации фотolumинесценции в магнитном поле, обусловленное антиферромагнитным взаимодействием между электронами внутренней  $3d^5$  оболочки Mn со связанными дырками.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается сравнительным анализом результатов, полученных с помощью различных современных экспериментальных методик, тщательным контролем условий эксперимента, цельностью и последовательностью всего полученного экспериментального материала и его интерпретации, использованием достоверных литературных источников.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что в ней:

- Разработаны научные основы технологии формирования нитевидных нанокристаллов на основе Ge, MnP, (Ga,Mn)As соединений и (In,Mn)As квантовых точек, которые могут

быть использованы для создания принципиально новых приборов спинтроники, а также нано- и оптоэлектроники.

- Получены новые знания о фундаментальных свойствах нового класса полупроводниковых магнитных наноструктур.
- Разработана методика определения значения модуля упругости нитевидных нанокристаллов с помощью растрового электронного микроскопа.
- Разработан метод нанесения электрических контактов к одиночным (Ga,Mn)As нитевидным нанокристаллам, который может быть использован для создания приборов на их основе, а также их технологического контроля.

#### **Апробация результатов работы.**

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: 3 международной школе и конференции по полупроводниковой спинтронике и квантовым информационным технологиям “SPINTECH III” (Япония, Хьюго, 2005); 66-й осенней конференции японского общества прикладной физики (Япония, Токушима, 2005); 29-й ежегодной конференции по магнетизму в Японии (Япония, Нагано, 2005); симпозиуме по тройным и многокомпонентным соединениям (Япония, Токио, 2005); симпозиуме “Будущие наноматериалы и когерентная оптика” (Япония, Токио, 2005); симпозиуме “Будущие наноматериалы” (Япония, Токио, 2006); 15-й международной конференции по тройным и многокомпонентным соединениям (Япония, Киото, 2006);

53-й весенней конференции японского общества прикладной физики (Япония, Токио, 2005); 14,17,18,21 международном симпозиуме “Наноструктуры: физика и технология”(Россия, Санкт-Петербург, 2006,2010, 2013;Белоруссия, Минск, 2009); международной конференции по магнетизму (Киото, 2006); 36-й национальной японской конференции по росту кристаллов (Япония, Осака, 2006); 28-й международной конференции по физике полупроводников (Австрия, Вена, 2006); весеннем симпозиуме европейского общества исследователей материалов (E-MRS) (Франция, Страсбург, 2007); 52-й конференции по магнетизму и магнитным материалам (США, Тампа, 2007); 17-й международной конференции по электронным свойствам двумерных систем и 13-й международной конференции по модулированным полупроводниковым структурам (Италия, Генуя, 2007); 8-м латино-американском симпозиуме по магнетизму, магнитным материалам и их применениям (Бразилия, Рио-де-Жанейро, 2007); международной конференции по нано науке и технологии (ICN+T) (Швеция, Стокгольм, 2007); XIII,XIV,XV,XVII международном симпозиуме «Нанофизика и нанoeлектроника» (Россия, Нижний Новгород, 2009, 2010, 2013 (приглашенный)); 4-м, 6-м семинаре по росту нитевидных нанокристаллов (Франция, Париж, 2009; Россия, Санкт-Петербург); 473 Хаерас семинаре “III-В нитевидные нанокристаллы - рост, свойства, применение” (Германия, БадОнеф, 2011); 3-й международной конференции “Современные направления научных исследований искусственных и природных нанообъектов” (Россия, Санкт-Петербург, 2012); международном семинаре по магнитным нанопроволокам и

нанотрубкам (Германия, Кауб, 2013); XI Российской конференции по физике полупроводников (Россия, Санкт-Петербург, 2013).

Результаты диссертационной работы были представлены на научных семинарах ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, ИАП РАН, Санкт-Петербургского Академического Университета – Научно-Образовательного Центра Нанотехнологий РАН, Санкт-Петербургского Государственного Университета, Токийского Университета Сельского Хозяйства и Технологии (Япония), Института Общества Макса Планка в г. Халле (Германия), Университета Вюрцбурга (Германия), Лаборатории Фотоники и Наноструктур Национального Центра Научных Исследований (Франция), Университета Ланкастера (Великобритания), Университета Дарема (Великобритания), Аальто Университета (Финляндия), заседании Ученого совета ИАП РАН.

Личное участие А.Д. Буравлева явилось определяющим в получении научных результатов, изложенных в диссертации. Понимание закономерностей технологических процессов формирования полупроводниковых магнитных наноструктур и физических процессов в них, достигнутое в результате работы, привело, в итоге, к развитию **научного направления** «полупроводниковые магнитные нитевидные нанокристаллы и квантовые точки».

Основные результаты диссертационной работы **опубликованы** в 54 печатных работах, в том числе 26 научных статьях в ведущих отечественных и международных журналах и 28 докладах в материалах конференций и симпозиумов. Список публикаций приведен в конце автореферата.

**Структура диссертации:** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. В диссертации содержится 85 рисунков, 2 таблицы и список цитированной литературы из 311 наименований. Общий объем диссертации составляет 217 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определяется актуальность темы настоящей диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, обосновывается научная новизна и практическая значимость работы, представлена структура диссертации и приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвященный магнитным наноструктурам.

В первом параграфе этой главы кратко рассмотрены различные типы наноструктур, и приводится их классификация.

Второй параграф посвящен основным методам формирования квазиодномерных наноструктур, которые подразделяются на две большие группы: «сверху-вниз» (top-down) и «снизу-вверх» (bottom-up). Особое внимание уделяется рассмотрению второй группы подходов, к числу которых относится и рост полупроводниковых нитевидных кристаллов по механизму «пар-жидкость-кристалл». Следует отметить, что данный механизм является одним из наиболее широко используемых методов для их синтеза. Тем не менее, в последнее время, особое внимание получают и альтернативные методы формирования подобных квазиодномерных наноструктур, основанные на самокаталитическом росте, селективной эпитаксии и т.д.

В третьем параграфе приведены различные способы формирования квантовых точек. В частности показано, что квантовые точки также могут быть синтезированы в рамках подхода «снизу-вверх» при эпитаксиальном осаждении полупроводниковых материалов рассогласованных по параметру кристаллической решетки с подложкой.

Четвертый параграф содержит информацию о создании магнитных полупроводников. Данные соединения являются объектами пристального внимания уже много десятилетий подряд. Хорошо известно, что обычные полупроводники в основном являются немагнитными материалами. С другой стороны, большинство магнетиков обладают металлическим типом проводимости, т.е. не являются полупроводниками, свойства которых можно контролировать путем приложения электрического поля. Поэтому комбинация свойств, как магнетиков, так и полупроводников в одном материале, безусловно, представляет значительный интерес. Тем не менее, впервые о синтезе магнитных тонких пленок на основе  $A_3B_5$  соединений, а точнее,  $(In,Mn)As$ , было сообщено лишь к концу 80-х годов прошлого века. Следует отметить, что это стало возможным благодаря развитию эпитаксиальных технологий и, в первую очередь, молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Немного позднее, был синтезирован  $(Ga,Mn)As$  -разбавленный магнитный полупроводник  $r$ -типа, продемонстрировавший ферромагнитные свойства. Этот полупроводник на сегодняшний день стал, по-сути, модельным и наиболее изученным среди подобных РМП соединений. В этом же параграфе приведен обзор свойств и основных технологических

аспектов его синтеза с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии, а также рассмотрены основные механизмы, которые были предложены на сегодняшний день для объяснения причин возникновения ферромагнитного упорядочения в этих соединениях.

В последнем параграфе первой главы рассказывается о синтезе и свойствах магнитных полупроводниковых наноструктур таких, как нитевидные нанокристаллы и квантовые точки.

**Вторая глава** посвящена синтезу и исследованию свойств нитевидных нанокристаллов на основе германия и фосфидов марганца.

В первом параграфе главы приводится краткое описание МПЭ установки, которая была использована для проведения ростовых экспериментов по синтезу магнитных полупроводниковых соединений типа  $MnGeP_2$ . Во время роста этих соединений было обнаружено, что при определенных технологических параметрах вместо ожидаемого роста тонких пленок происходит формирование нитевидных нанокристаллов (ННК).

Второй параграф посвящен подробному изучению свойств выращенных образцов. На основании результатов проведенных экспериментов было показано, что с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии были синтезированы Ge,  $Mn_2P$  и  $MnP$  ННК. Исследование структурных свойств ННК с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) позволило установить, что роль катализаторов роста для Ge ННК играют нанокластеры на основе Mn. При этом Ge ННК формируются вдоль кристаллографических направлений типа  $\langle 110 \rangle$  и обладают высоким кристаллическим качеством. В свою очередь, изучение магнитных

свойств образцов с GeННК, выполненное с помощью СКВИД магнитометра, выявило наличие ферромагнитного упорядочения до 300 К. Было установлено, что наблюдаемые ферромагнитные свойства ННК, прежде всего, могут быть обусловлены наличием  $Mn_3Ge_5$  фаз.

Результаты исследования процессов роста и свойств нитевидных кристаллов на основе фосфидов марганца приведены в третьем параграфе второй главы. В начале параграфа содержится информация о свойствах фосфида марганца, который обладает орторомбической структурой и сильной магнитной анизотропией, проявляя при этом ферромагнитные свойства до  $\sim 291K$ . Уникальность свойств данного материала позволяет рассматривать его как с точки зрения потенциального использования для создания спинтронных устройств, так и магнитных холодильников. Данные о синтезе и свойствах нитевидных нанокристаллов на основе этого материала приводятся далее. Показано, что формирование Mn:P ННК происходит благодаря механизмам самоиндуцированного роста. При этом MnP ННК могут быть получены при ростовых температурах до  $510^{\circ}C$ , которая является оптимальной температурой для подобных наноструктур. В свою очередь, при более высокой температуре роста  $\sim 535^{\circ}C$  формируются  $Mn_2P$  ННК, причем как на InP(100), так и на GaAs(111)В подложках. Тогда как повышение ростовой температуры до  $545^{\circ}C$ , приводит к сильному изменению формы ННК, развитию бокового роста ННК, а также случайному формированию боковых ветвей у некоторых ННК. Кроме того, приводятся данные об обнаружении принципиально нового метода формирования ННК, при котором источником материала для их

роста служит сама подложка. Следует отметить, что данный метод открывает широкие перспективы для создания гибридных наноструктур. Исследование магнитных свойств образцы с гибридными MnP/InP ННК, полученных с помощью этого метода, показало, что они проявляют ферромагнитное упорядочение до температур порядка 310К. При этом в отличие от объемных образцов MnP, для которых наблюдалась 180° симметрия угловых зависимостей ферромагнитного резонанса, образцы с гибридными MnP/InP ННК продемонстрировали наличие 90° симметрии, что может являться дополнительным подтверждением формирования анизотропных наноструктур.

**Третья глава** посвящена исследованию процессов синтеза и свойств нитевидных нанокристаллов на основе разбавленных магнитных полупроводников типа (Ga,Mn)As.

В первом параграфе третьей главы приводится описание ростовых процессов, а также морфологических и структурных свойств (Ga,Mn)AsННК, которые были синтезированы методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием в качестве катализатора роста Mn при повышенных температурах роста (~420-660°C). Показано, что рост (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов должен происходить в условиях стабилизации по элементам металлической группы (Ga,Mn).Продемонстрировано, что большинство (Ga,Mn)As ННК, синтезированных при температуре роста 485°C, ориентировано вдоль кристаллографических направлений типа <111> и <110>. При этом небольшая часть ННК в соотношении 1:15 ориентирована вдоль кристаллографических направлений типа <310>. Кроме того, в этом параграфе приведены

данные исследования влияния потока мышьяка на рост  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ ННК. В результате проведенных исследований было установлено, что при малых потоках мышьяка рост нитевидных нанокристаллов лимитируется скоростью кристаллизации материала под каплей. Однако при больших потоках мышьяка кинетика роста определяется транспортом галлия в каплю. Экспериментально продемонстрировано, что при малых потоках мышьяка зависимость длины от диаметра нитевидного нанокристалла является монотонно возрастающей, хорошо описываемой в рамках модели Гиваргизова-Чернова. При этом монотонно убывающая диффузионная зависимость наблюдается при больших потоках мышьяка. В конце параграфа приводятся результаты изучения структурных свойств и химического состава  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  ННК, синтезированных при температуре  $485^\circ\text{C}$ . Было установлено, что ННК обладают кубической кристаллической структурой и, несмотря на относительно высокие температуры роста, не происходит сегрегации вторичных фаз внутри и на боковых стенках ННК. Показано, что некоторые из  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  ННК, содержат характерные особенности – дефекты упаковки, которые располагаются параллельно оси роста ННК. Было обнаружено, что рост  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$  ННК может сопровождаться формированием на границе двумерного слоя между ними  $\alpha\text{-MnAs}$  преципитатов, обладающих гексагональной кристаллической структурой.

Во втором параграфе представлены результаты изучения механических свойств одиночных  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$ ННК. При исследовании с помощью РЭМ морфологии массивов ННК, выращенных методом МПЭ при температуре  $660^\circ\text{C}$ , было

обнаружено, что при определённых скоростях сканирования, наблюдается размытие изображений ННК. Детальное изучение положений конкретных  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  ННК показало, что ННК совершают колебания. Перемещение луча РЭМ при сканировании изображения, по-видимому, может приводить к зарядке-разрядке вершины ННК и, как следствие, к кулоновскому взаимодействию между ННК и пучком электронов, что и являлось причиной возникновения наблюдаемых колебаний ННК. Для определения частот собственных механических колебаний, эпитаксиально выращенный ННК рассматривался как аналог стержня с одним свободным и одним заделанным концом. Моделирование экспериментальных изображений позволило определить условия для возникновения разного типа механических колебаний одиночных ННК под действием луча РЭМ и значение модуля Юнга для  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$ ННК, которое составило 40 ГПа. Таким образом, был предложен новый метод измерения модуля Юнга нитевидных нанокристаллов.

Третий параграф содержит информацию об исследовании магнитных и оптических свойств  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$ ННК. При изучении магнитных свойств было установлено, что образцы с  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  ННК, синтезированные при высоких ростовых температурах (550-660°C) проявляют парамагнитное поведение. Обнаружено, что ферромагнитные свойства образцов с  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  ННК, синтезированных при более низких ростовых температурах, определяются, в том числе, гексагональными  $\alpha\text{-MnAs}$  преципитатами. Использование специально разработанной методики для изучения магнитных свойств самих  $(\text{Ga,Mn})\text{As}$  ННК позволило

установить, что они проявляют ферромагнитное упорядочение до температур порядка 70К. Таким образом, было показано, что несмотря на сегрегацию вторичных фаз типа  $\alpha$ -MnAs преципитатов во время роста ННК, при повышенных температурах синтеза (по сравнению с температурами роста тонких пленок) могут быть получены (Ga,Mn)As ННК, проявляющие ферромагнитные свойства. В свою очередь, на основании данных, полученных при исследовании образцов с помощью методики горячей фотолюминесценции, было установлено, что при росте (Ga,Mn)As ННК атомы Mn занимают катионные позиции в кристаллической решетке. Путем сравнения данных исследований образца с тонкой пленкой на основе (Ga,Mn)As была определена приблизительная концентрация атомов Mn в ННК, которая составила  $\sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

В четвертом параграфе представлены результаты изучения электрофизических свойств одиночных (Ga,Mn)AsННК. Для этого были разработаны две методики нанесения контактов, которые заключались в использовании метода электронно-лучевой литографии. При этом было установлено, что температуры отжига существенно влияет на свойства контактов. Было обнаружено, что повышение температуры отжига ведет к деградации структур. При этом была определена оптимальная температура отжига, равная 160°C. Аппроксимация вольт-амперных характеристик одиночного (Ga,Mn)AsННК, синтезированного при 450°C, производилась в рамках модели, согласно которой ННК с двумя нанесёнными металлическими контактами рассматривался в виде эквивалентной схемы с двумя включенными на встречу диодами, между которыми находится сопротивление определяемое свойствами ННК. Она

позволила оценить как степень легирования полученных ННК ( $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), так и значение подвижности носителей заряда  $\sim 160 \cdot \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

**Четвертая глава** посвящена изучению квантовых точек на основе (In,Mn)As разбавленных магнитных полупроводников.

В первом параграфе приведена информация о формировании (In,Mn)As квантовых точек на поверхности GaAs(100), исследование которых производилось с помощью метода атомно-силовой микроскопии. Было установлено, что при росте квантовых точек диффузионные процессы, связанные с наличием в системе атомов Mn, оказывают существенное влияние на процессы формирования квантовых точек и их структурные свойства.

Во втором параграфе четвертой главы представлены результаты исследований образцов с (In,Mn)As квантовыми точками, которые были синтезированы для оптических измерений. Для повышения кристаллического качества структур ростовые эксперименты проводились при более высоких температурах роста. В свою очередь, для контроля влияния Mn, при его встраивании в КТ, использовалось не постоянное, а селективное легирование Mn при формировании КТ. При исследовании структурных свойств образцов было показано, что легирование Mn на заключительном этапе роста КТ приводит к образованию дислокаций несоответствия вдоль плоскостей типа  $\{111\}$ , тогда как при селективном легировании Mn лишь центральной части КТ в образце не наблюдается протяженных дефектов.

Сравнение спектров фотолюминесценции образцов с InAs и (In,Mn)As КТ, полученных путем селективного легирования центральной части, показало, что при использовании Mn, положение

максимума линии, связанной с КТ, смещается в область больших энергий. Изучение поляризации фотолуминесценции в магнитном поле показало, что для образца с InAs КТ поляризация близка к нулю, тогда как для образца с (In,Mn)As КТ наблюдается характерное поведение, обусловленное антиферромагнитным взаимодействием между электронами внутренней  $3d^5$  оболочки Mn со связанными дырками. На основе полученных данных был сделан вывод о том, что в случае легирования Mn центральных частей КТ, атомы Mn занимают в кристаллической подрешетке катионные места. Таким образом, проведенные исследования фотолуминесценции подтвердили данные структурных исследований свидетельствующие о том, что при селективном легировании Mn только центральных частей КТ можно получить наноструктуры обладающие высоким кристаллическим качеством, которые потенциально могут быть использованы для создания принципиально новых светоизлучающих устройств спинтроники и оптоэлектроники. Кроме того, были синтезированы многослойные структуры с массивами (In,Mn)As квантовых точек. Данных их исследования, приведенные в конце параграфа, показали, что при росте многослойных структур с (In,Mn)As КТ увеличение времени роста образцов, приводит к возникновению обратной диффузии из КТ, которая усиливается со временем роста и, в конечном итоге, приводит к образованию дефектов. Следовательно, для роста структур с большим количеством слоев необходимо снижать температуру роста. При выбранных технологических параметрах, количество слоев не должно превышать трех для получения высококачественных структур.

В **заклучении** приводятся основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Показано, что с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии при использовании крекингового источника для получения потока димеров фосфора могут быть синтезированы Ge,  $Mn_2P$ , MnP а также гибридные MnP/InP нитевидные нанокристаллы. Установлено, что роль катализаторов для роста Ge нитевидных нанокристаллов, которые проявляют ферромагнитные свойства вплоть до комнатных температур, играют нанокластеры на основе Mn.
2. Продемонстрировано, что формирование Mn:P ННК происходит благодаря механизмам самоиндуцированного роста. Обнаружено, что MnP ННК могут быть получены при температурах роста до  $510^{\circ}C$ , которая является оптимальной температурой для подобных наноструктур. При более высокой температуре роста  $\sim 535^{\circ}C$  формируются  $Mn_2P$  ННК, причем как на InP(100), так и на GaAs(111)В подложках.
3. Обнаружен новый метод формирования ННК, при котором источником материала для их роста служит сама подложка. Продемонстрировано, что полученные на основе этого метода образцы с гибридными нитевидными нанокристаллами на основе MnP/InP проявляют ферромагнитные свойства до температур порядка 310К. При этом, в отличие от объемных

образцов MnP, для которых наблюдалась  $180^\circ$  симметрия угловых зависимостей ферромагнитного резонанса, обнаружено, что образцы с гибридными MnP/InP ННК проявляют наличие  $90^\circ$  симметрии, что может являться дополнительным подтверждением формирования анизотропных наноструктур.

4. Продемонстрировано, что использование в качестве катализатора роста Mn позволяет синтезировать нитевидные нанокристаллы на основе разбавленных магнитных полупроводников типа (Ga,Mn)As с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии при условии стабилизации по элементам металлической группы. Установлено, что (Ga,Mn)As ННК, синтезированные при  $485^\circ\text{C}$ , обладают кубической кристаллической структурой, а при их росте не происходит сегрегации вторичных фаз внутри и на боковых стенках ННК, несмотря на относительно высокую ростовую температуру.
5. Показано, что при малых потоках мышьяка рост (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов лимитируется скоростью кристаллизации материала под каплей. Однако при больших потоках мышьяка кинетика роста определяется транспортом галлия в каплю. Экспериментально продемонстрировано, что при малых потоках мышьяка зависимость длины от диаметра нитевидного нанокристалла является монотонно возрастающей, хорошо описываемой в рамках модели Гиваргизова-Чернова. В то же время, монотонно убывающая диффузионная зависимость наблюдается при больших потоках мышьяка.

6. Продemonстрировано, что (Ga,Mn)As нитевидные нанокристаллы могут проявлять ферромагнитное упорядочение вплоть до 70 К.
7. Установлено, что при росте ННК атомы Mn занимают катионные позиции в кристаллической решетке. Путем сравнения данных исследований образца с тонкой пленкой на основе (Ga,Mn)As была определена приблизительная концентрация атомов Mn в ННК ( $\sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ).
8. Продemonстрировано, что возбуждение механических колебаний одиночных (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов и их непосредственная регистрация с помощью растрового электронного микроскопа позволяет определить значение модуля упругости исследуемых нитевидных нанокристаллов. Полученное экспериментально значение модуля Юнга для (Ga,Mn)As ННК составило 40 ГПа.
9. Обнаружено, что температура отжига существенно влияет на свойства электрических контактов, которые могут быть созданы с помощью электронно-лучевой литографии, к одиночным (Ga,Mn)As ННК. Установлено, что оптимальной температурой отжига является  $160^\circ\text{C}$ . Аппроксимация результатов измерений вольт-амперных характеристик позволила оценить как степень легирования полученных ННК ( $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), так и значение подвижности носителей заряда в ННК  $\sim 160 \cdot \text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .
10. Обнаружено, что при росте (In,Mn)As квантовых точек на поверхности GaAs(100) диффузионные процессы, связанные с наличием в системе атомов Mn, оказывают существенное влияние на процессы формирования квантовых точек и их

структурные свойства.

11. Показано, что метод эпитаксиального выращивания магнитных квантовых точек, основанный на селективном легировании атомами Mn их центральных частей, позволяет получить структуры с высоким кристаллическим качеством. Продемонстрировано, что при использовании этого метода для роста (In,Mn)As квантовых точек, они проявляют поведение поляризации фотолюминесценции в магнитном поле, обусловленное антиферромагнитным взаимодействием между электронами внутренней  $3d^5$  оболочки Mn со связанными дырками, вследствие занятия атомами Mn в кристаллической подрешетке катионных мест.

#### Список цитированной литературы:

- Грюнберг П.А.** От спиновых волн к гигантскому магнетосопротивлению и далее/ Грюнберг П.А.// УФН.- **2008**.- Т. 178 (12).- С.1349-1358.
- Захарченя Б.П.** Интегрируя магнетизм в полупроводниковую электронику/ Б.П. Захарченя, В.Л. Корнев// УФН.- **2005**.- 175 (6).- С. 629-635.
- Кусраев Ю.Г.** Спинтроника / Ю.Г. Кусраев// УФН.- 2010.- Т. 180 (7).- С. 759-773.
- Моргунов Р.Б.** Спиновая динамика в наноструктурах магнитных полупроводников/ Р.Б. Моргунов, А.И. Дмитриев// ФТТ.- **2009**.- Т. 51 (10).- С. 1873-1889.
- Ферт А.** Происхождение, развитие и перспективы спинтроники/ Ферт А.// УФН.- **2008**.- Т. 178 (12).- С. 1336-1348.
- Vaibich M.N.** Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices/ M.N. Vaibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau,

- F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas/ *Phys. Rev. Lett.*- **1988**.- V. 61.- P. 2472-2475.
- Binasch G.** Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange, G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn// *Phys. Rev.*- **1989**.- V. 39.- P. 4828-4830.
- Datta S.** Electronic analog of the electrooptic modulator/ S. Datta, B. Das// *Appl. Phys. Lett.*-**1990**.- V.- 56.- P.665-667.
- Dietl T.** Dilute ferromagnetic semiconductors: physics and spintronic structures/ T. Dietl, H. Ohno// *arXiv*. – **2013**.- 1307.3429v2.
- Furdyna J.K.** Diluted magnetic semiconductors/ J.K. Furdyna// *J. Appl. Phys.*-**1988**.- V.-64. P.29-64.
- Korenev V.L.** Dynamic spin polarization by orientation-dependent separation in a ferromagnet–semiconductor hybrid/ V.L. Korenev, I.A. Akimov, S.V. Zaitsev, V.F. Ssapega, L. Langer, D.R. Yakovlev, Yu.A. Danilov, M. Bayer// *Nature Comm.*3.-**2012**.- 10.1038.
- Mathieu R.** Magnetization of ultrathin (Ga,Mn)As layers/ R. Mathieu, B.S. Sørensen, J. Sadowski, U. Södervall, J. Kanski, P. Svedlindh, P. E. Lindelof, D. Hrabovsky, E. Vanelle// *Phys. Rev. B*.- **2003**.- V.-68.- 184421.
- Moore G.E.** Cramming more components onto integrated circuits/ G.E. Moore// *Electronics*.-**1965**.- V.-38 (8).- P. 114–117.
- Munekata H.** Diluted magnetic III-V semiconductors/ H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnar, A. Segmüller, L.L. Chang, L. Esaki// *Phys. Rev. Lett.*- **1989**.- V.-63.- P.1849-1852.
- Němec P.** The essential role of carefully optimized synthesis for elucidating intrinsic material properties of (Ga,Mn)As/ P. Němec, V. Novák, N. Tesařová, E. Rozkotová, H. Reichlová, D. Butkovičová, F. Trojánek, K. Olejník, P. Malý, R.P. Campion, B.L. Gallagher, J. Sinova, T. Jungwirth// *Nature Comm.*- **2013**.- V.4.- 10.1038/ncomms2426.
- Ohno H.** (Ga,Mn)As: A new diluted magnetic semiconductor based on GaAs/ H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye// *Appl. Phys. Lett.*- **1996**.- V.- 69.- P. 363-365.
- Zutic I.** Spintronics: Fundamentals and applications/ I. Zutic, J. Fabian, S. Das Sarma// *Rev. Mod. Phys.*-**2004**.- V.-76.- P. 323-410.

## Список публикаций автора по теме работы:

### публикации в рецензируемых журналах:

- A1. K. Minami, **A.D. Bouravleuv**, Y. Sato, T. Ishibashi, N. Kuwano, K. Sato/ MBE growth and TEM analyses in Mn–Ge–P compounds// *Phys. Stat. Sol. (a)***203**, 2788-2792 (2006).
- A2. **A.D. Bouravleuv**, K. Minami, T. Ishibashi, K. Sato/ Self-assembled nanowhiskers grown by MBE on InP(001) surface// *Phys. Stat. Sol. (a)***203**, 2793-2799 (2006).
- A3. K. Sato, **A. Bouravleuv**, A. Koukitu, T. Ishibashi/ Self-Assembled Growth and Characterization of Mn<sub>x</sub>P Nanowires// *Jpn. J. Appl. Phys.***47**, 8214-8217 (2008).
- A4. **A.D. Bouravleuv**, S. Mitani, R.M. Rubinger, M.C. do Carmo, N.A. Sobolev, T. Ishibashi, A. Koukitu, K. Takashashi, K. Sato/ Magnetic properties of MnP nanowhiskers grown by MBE// *Physica E* **40**, 2037-2039 (2008).
- A5. M.S. Reis, R. Rubinger, N. Sobolev, M.A. Valente, K. Yamada, K. Sato, Y. Todate, **A. Bouravleuv**, P.J. von Ranke, S. Gama/ Influence of strong magnetic anisotropy on the magnetocaloric effect of MnP single crystal// *Phys. Rev.* **B77**, 104439 (2008).
- A6. G.E. Cirlin, V.G. Dubrovskii, I.P. Soshnikov, N.V. Sibirev, Yu.B. Samsonenko, **A.D. Bouravleuv**, J.C. Harmand, F. Glas/ Critical diameters and temperature domains for MBE growth of III–V nanowires on lattice mismatched substrates// *Phys. Stat. Sol. RRL***3**, 112–114 (2009).
- A7. U. Perinetti, N. Akopian, Yu.B. Samsonenko, **A.D. Bouravleuv**, G.E. Cirlin, V. Zwiller/ Sharp emission from single InAs quantum dots grown on vicinal GaAs surfaces// *Appl. Phys. Lett.***94**, 163114 (2009).
- A8. V.G. Dubrovskii, N.V. Sibirev, G.E. Cirlin, **A.D. Bouravleuv**, Yu.B. Samsonenko, D.L. Dheeraj, H.L. Zhou, C. Sartel, J.C. Harmand, G. Patriarche, F. Glas// Role of nonlinear effects in nanowire growth and crystal phase// *Phys. Rev.* **B80**, 205305 (2009).

- A9. **A.D. Bouravleuv**, N.V. Sibirev, G. Statkute, G.E. Cirlin, H. Lipsanen, V.G. Dubrovskii/ Influence of substrate temperature on the shape of GaAs nanowires grown by Au-assisted MOVPE// *J. Cryst. Growth***312**, 1676–1682 (2010).
- A10. B.V. Novikov, S.Yu. Serov, N.G. Filosofov, I.V. Strohm, V.G. Talalaeв, O.F. Vyvenko, E.V. Ubyivovk, Yu.B. Samsonenko, **A.D. Bouravleuv**, I.P. Soshnikov, N.V. Sibirev, G.E. Cirlin, V.G. Dubrovskii/ Photoluminescence properties of GaAs nanowire ensembles with zincblende and wurtzite crystal structure// *Phys. Stat. Sol. RRL***4**, 175–177 (2010).
- A11. G.E. Cirlin, V.G. Dubrovskii, Yu.B. Samsonenko, **A.D. Bouravleuv**, K. Durose, Y.Y. Proskuryakov, B. Mendes, L. Bowen, M.A. Kaliteevski, R.A. Abram, D. Zeze/ Self-catalyzed, pure zincblende GaAs nanowires grown on Si(111) by molecular beam epitaxy// *Phys. Rev.* **B82**, 035302 (2010).
- A12. Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин, А.И. Хребтов, **А.Д. Буравлев**, Н.К. Поляков, В.П. Улин, В.Г. Дубровский, P. Werner/ Исследование процессов самокаталитического роста GaAs нитевидных кристаллов на модифицированных поверхностях Si(111), полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии// *ФТП***45**, 441-445 (2011).
- A13. С.В. Карпов, Б.В. Новиков, М.Б. Смирнов, В.Ю. Давыдов, А.Н. Смирнов, И.В. Штром, Г.Э. Цырлин, **А.Д. Буравлев**, Ю.Б. Самсоненко/ Особенности спектров рамановского рассеяния нитевидных кристаллов на основе соединений AlB5// *ФТТ***53**, 1359 – 1366 (2011).
- A14. **А.Д. Буравлев**, Г.Э. Цырлин, В.В. Романов, Н.Т. Баграев, Е.С. Брилинская, Н.А. Лебедева, С.В. Новиков, H. Lipsanen, В.Г.Дубровский/ Формирование (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов и изучение их магнитных свойств// *ФТП***46**, 188-193 (2012).
- A15. V.N. Kats, V.P. Kochereshko, A.V. Platonov, T.V. Chizhova, G.E. Cirlin, **A.D. Bouravleuv**, Yu.B. Samsonenko, I.P. Soshnikov, E.V. Ubyivovk, J. Bleuse, H. Mariette/

- Optical study of GaAs quantum dot embedded into AlGaAs nanowires// *Sem. Sci. Tech.* **27**, 015009 (2012).
- A16. **А.Д. Буравлев**, А.А. Зайцев, П.Н. Брунков, В.Ф. Сапега, А.И. Хребтов, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин, В.Г. Дубровский, В.М. Устинов/  
Исследование процессов формирования самоупорядоченных квантовых точек на основе (In,Mn)As// *ПЖТФ***38**, 21-27 (2012).
- A17. **А.Д. Буравлев**, Г.О. Абдрашитов, Г.Э. Цырлин/ Молекулярно-пучковая эпитаксия (Ga,Mn)As нитевидных кристаллов на поверхности GaAs(100)// *ПЖТФ***38**, 78-83 (2012).
- A18. M. Tchernycheva, L. Rigutti, G. Jacopin, A. de Luna Bugallo, P. Lavenus, F.H. Julien, M. Timofeeva, **A.D. Bouravleuv**, G.E. Cirlin, V. Dhaka, H. Lipsanen, L. Largeau/ Photovoltaic properties of GaAsP core-shell nanowires on Si(001) substrate// *Nanotechnology***23**, 265402 (2012).
- A19. **А.Д. Буравлев**, Д.В. Безнасюк, Е.П. Гильштейн, М. Tchernycheva, A. De Luna Bugallo, L. Rigutti, L. Yu, Yu. Proskuryakov, И.В. Штром, М.А. Тимофеева, Ю.Б. Самсоненко, А.И. Хребтов, Г.Э.Цырлин /  
Исследование фотоэлектрических свойств массивов нитевидных нанокристаллов GaAs:Be // *ФТП***47**, 797-801 (2013).
- A20. С.А. Блохин, А.М.Надточий, А.А. Красивичев, Л.Я. Карачинский, А.П. Васильев, В.Н. Неведомский, М.В. Максимов, Г.Э. Цырлин, **А.Д. Буравлев**, Н.А. Малеев, А.Е. Жуков, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов/  
Оптическая анизотропия квантовых точек InGaAs// *ФТП***47**, 87-91 (2013).
- A21. **A. Bouravleuv**, G. Cirlin, V. Sapega, P. Werner, A. Savin, H. Lipsanen/ Ferromagnetic (Ga,Mn)As nanowires grown by Mn-assisted molecular beam epitaxy// *J. Appl. Phys.* **113**, 144303 (2013).
- A22. **А.Д. Буравлев**, В.Н. Неведомский, Е.В. Убийвовк, В.Ф. Сапега, А.И. Хребтов, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин, В.М. Устинов/  
Квантовые точки (In,Mn)As: синтез методом молекулярно-

пучковой эпитаксии и оптические свойства// *ФТП***47**, 1033-1036 (2013).

- A23. Н.В. Сибирев, **А.Д. Буравлев**, Ю.М. Трушков, Д.В. Безнасюк, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин/ Влияние потока мышьяка при молекулярно-пучковой эпитаксии самокаталитических нитевидных нанокристаллов (Ga,Mn)As// *ФТП***47**, 1425-1430 (2013).
- A24. **А.Д. Буравлев**, Н.В. Сибирев, Д.В. Безнасюк, N. Lebedeva, S. Novikov, H. Lipsanen, Г.Э. Цырлин/ Новый метод определения модуля Юнга (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов с помощью растрового электронного микроскопа// *ФТТ***55**, 2118-2122 (2013).
- A25. V.N. Trukhin, A.S. Buyskikh, N.A. Kaliteevskaya, **A.D. Bouravleuv**, L.L. Samoilov, Yu.B. Samsonenko, G.E. Cirlin, M.A. Kaliteevski, A.J. Gallant/ Terahertz generation by GaAs nanowires// *Appl. Phys. Lett.* **103**, 072108 (2013).
- A26. **А.Д. Буравлев**, Н.В. Сибирев, Е.П. Гильштейн, П.Н. Брунков, И.С. Мухин, М. Tchernycheva, А.И. Хребтов, Ю.Б. Самсоненко, Г.Э. Цырлин/ Исследование электрических свойств одиночных (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов// *ФТП***48**, 358-363 (2014).

#### публикации в материалах научных мероприятий:

- A27. **A.D. Bouravleuv**, K. Minami, T. Ishibashi, K. Sato/ MBE growth and properties of self-assembled nanowhiskers on InP(001) surface// Ext. abs. of the 66th Autumn Meeting of the Japan Society of Applied Physics, (7-11 September, 2005), Tokushima, Japan, No. 1, p. 361.
- A28. K. Minami, **A.D. Bouravleuv**, Y. Sato, T. Ishibashi, K. Sato/ Preparation and characterization in MnGeP<sub>2</sub> thin film// Proc. of Workshop on Ternary and Multinary Compounds, (25-26 November, 2005), Tokyo, Japan, pp. 193-196. (in Jpn.)
- A29. **A.D. Bouravleuv**, K. Minami, T. Ishibashi, K. Sato/ Self-assembled nanowhiskers on InP(001) surface// Proc. of Workshop on Ternary

- and Multinary Compounds, (25-26 November, 2005), Tokyo, Japan, pp. 181-184.
- A30. K. Minami, **A.D. Bouravleuv**, Y. Sato, T. Ishibashi, K. Sato/ Fabrication and characterization of MnP// Ext. Abs. of Colloquium on “Future Nano-materials and Coherent Optical Science”, (December 10, 2005), Tokyo, Japan, p. 41. (inJpn).
- A31. **A.D. Bouravleuv**, K. Minami, T. Ishibashi, K. Sato/ Self-assembled semiconductor nanowiskers on InP(001) surface// Ext. Abst. of COE meeting “Future Nano-materials and Coherent Optical Science”, (December 10, 2005), Tokyo, Japan, p. 38.
- A32. **A.D. Bouravleuv**, K. Minami, T. Ishibashi, K. Sato/ MBE growth of Mn-based nanowhiskers on different semiconductor substrates// Ext. Abs. of Colloquium on “Future Nano-materials”, (February 23, 2006), Tokyo, Japan, p. 48.
- A33. **A.D. Bouravleuv**, K. Minami, T. Ishibashi, K. Sato/ MnP and Ge self-assembled nanowhiskers on InP(001)// Proc. of the 14th Int. Symp. on Nanostr.: Physics and Technology (NANO2006), (26-30 June 2006), St.Petersburg, Russia, p. 96-97.
- A34. K. Sato, **A. Bouravleuv**, K. Minami, Y. Sato and T. Ishibashi/ Self-assembled MnP and Ge nanowhiskers: MBE growth and properties// The 36th National Conf. on Crystall Growth (NCCG36) of Jap. Assoc. for Cryst. Growth (JACG), (1-3 November 2006) Osaka, Japan, *J. Jap. Assos.for Cryst. Growth***33**, p. 104. (inJpn.)
- A35. **A.D. Bouravleuv**, K. Minami, Y. Sato, T. Ishibashi, K. Sato: MBE growth and characterization of MnP and Ge nanowhiskers. Proc. of the 28th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors (ICPS28), (July 24-28 2006), Vienna, Austria. Ed. by W. Jantsch and F. Schaffler. *AIP Conf. Proc.* **893**, 57-58 (2007).
- A36. **A.D. Bouravleuv**, H Sosiati, T Ishibashi, N Kuwano, K Sato/ MBE fabrication of  $Mn_xP_n$  nanowhiskes// Proc, of the Int. Conf. on Nano Science and Technology (ICN+T 2007), (July 1-6 2007), Stockholm, Sweden, *J. Phys.: Conf. Series***100**, 052052 (2008).
- A37. Г.Э. Цырлин, **А.Д. Буравлев**, Ю.Б. Самсоненко, G. Statkute, H. Lipsanen/ Рост A3B5 нитевидных нанокристаллов без внешнего

- катализатора// Труды XIII Межд. симп. «Нанофизика и наноэлектроника», 16-20 марта 2009, Н.Новгород, с. 28-29.
- A38. G.E. Cirlin, Yu.B. Samsonenko, **A.D. Bouravleuv**, I.P. Soshnikov, N.K. Polyakov, N.V. Sibirev, V.G. Dubrovskii, M. Tchernycheva, J.C. Harmand/ A3B5 coherentnanowiresonsiliconsubstrates: MBEgrowthandproperties// Proc.17thInt. Symp. “Nanost.: physics and technology” – June 22-26, 2009, Minsk, 2009, p.123-124.
- A39. **A.D. Bouravleuv**, G. Statkute, G.E. Cirlin, H. Lipsanen/ Self-catalized MOVPE growth of GaAs whiskers// Proc.17th Int. Symp. “Nanostr.: physics and technology” – June 22-26, 2009, Minsk, 2009, p.125-126.
- A40. B.V. Novikov, S.Yu. Serov, N.G. Filosofov, I.V. Shtrom, V.G. Talalalev, O.F. Vyvenko, E.V. Ubyivovk, Yu.B. Samsonenko, **A.D. Bouravleuv**, I.P. Soshnikov, N.V. Sibirev, V.G. Dubrovskii, G.E. Cirlin/ Optical properties of GaAs nanowires studied by low temperature photoluminescence// Proc.17th Int. Symp. “Nanostr.: physics and technology” – June 22-26, 2009, Minsk, 2009, p.186-187.
- A41. **A.D. Bouravleuv**, G.E. Cirlin, K. Sato, S. Novikov, N. Lebedeva, H. Lipsanen/ MBE growth of MnP and GaMnAsnanowhiskers// Abs. 4th Nanowire growth workshop, Paris, France, October 26-27, 2009, p.40.
- A42. Н.В. Сибирев, Г.Э. Цырлин, **А.Д. Буравлев**, М.В. Назаренко, Ю.Б. Самсоненко, М.А. Тимофеева, В.Г. Дубровский/ Поверхностная энергия III-V соединений и нелинейные эффекты роста полупроводниковых нитевидных кристаллов// Труды XIV международного симпозиума «Нанофизика и Наноэлектроника», Н.Новгород, 15 – 19 марта, 2010, с. 527-528.
- A43. B.V. Novikov, S.Yu. Serov, N.G. Filosofov, I.V. Strohm, V.G. TalalaeV, O.F. Vyvenko, E.V. Ubyivovk, A.S. Bondarenko, Yu.B. Samsonenko, **A.D. Bouravleuv**, I.P. Soshnikov, N.V. Sibirev, V.G. Dubrovskii, G.E. Cirlin/ Photoluminescence study of GaAs nanowires of different crystal structures// Proc.18th International Symposium “Nanostructures: physics and technology” – June 21-26, 2010, St.Petersburg, Russia, 2010, p.234-235.

- A44. **A. Bouravleuv**, S. Novikov, N. Lebedeva, N. Sibirev, G. Cirlin, H. Lipsanen/ (GaMn)As nanowiskers grown by molecular beam epitaxy// Proc.18th International Symposium “Nanostructures: physics and technology” – June 21-26, 2010, St.Petersburg, Russia, 2010, p.331-332.
- A45. Yu.B. Samsonenko, **A.D. Bouravleuv**, N.K. Polyakov, V.P. Ulin, A.G. Gladyshev, G.E. Cirlin/ Self-catalysed molecular beam growth of III-V nanowires on different substrates// Proc.18th International Symposium “Nanostructures: physics and technology” – June 21-26, 2010, St.Petersburg, Russia, 2010, p.341-342.
- A46. I.P. Soshnikov, A.G. Gladushev, Dm. Afanasyev, G.E. Cirlin, **A.D. Bouravlev**, Yu.B. Samsonenko/ Growth of ordered III-V nanowiskers using electron lithography// Proc.18th International Symposium “Nanostructures: physics and technology” – June 21-26, 2010, St.Petersburg, Russia, 2010, p.347-348.
- A47. **А. Буравлев**, Г. Цырлин, В. Романов, Н. Баграев, Е. Брилинская, Н. Лебедева, С. Новиков, Н. Lipsanen, В. Дубровский/ Магнитные нановискеры на основе MnP и (GaMn)As// Труды XV международного симпозиума «Нанопизика и Нанозлектроника», Н.Новгород, 14 – 18 марта, 2011, с. 270-271.
- A48. **A. Bouravleuv**, G. Cirlin, V. Sapega, P. Werner, A. Savin, H. Lipsanen/ (Ga,Mn)As nanowires: MBE growth and magnetic properties// Proc. 6th Nanowire Growth Workshop, St.Petersburg, Russia, June 4-6, 2012, p. 64.
- A49. S.V. Zaitsev, **A.D. Bouravleuv**, G. Cirlin/ Optical characterization of GaAs and (GaMn)As nanowires// Proc. 6th Nanowire Growth Workshop, St.Petersburg, Russia, June 4-6, 2012, p.89.
- A50. **A.D. Bouravleuv**, P.N. Brunkov, V.F. Sapega, A.I. Khrebtov, Yu.B. Samsonenko, G.E. Cirlin, V.M. Ustinov/ MBE growth of (In,Mn)As quantum dots// Proc. 3d Int. Conf. “State-of-art trends of scientific research of artificial and natural nanoobjects” (STRANN’12), St.Petersburg, Russia, October 10-12, 2012, p. 62-63.

- A51. **А.Д. Буравлев**/ Наноструктуры на основе разбавленных магнитных полупроводников// Труды XVII международного симпозиума «Нанофизика и Наноэлектроника», Н.Новгород, 11 – 15 марта, 2013, с. 374-375.
- A52. I.M. Trushkov, N.V. Sibirev, **A.D. Bouravleuv**, D.V. Beznasyuk, G.E. Cirilin/ The influence of As flux on the self-catalyzed III-As nanowires growth// Proc.21st Int. Symp. “Nanostructures: physics and technology” – June 24-28, 2013, St.Petersburg, Russia, 2013, p.208-209.
- A53. **А.Д. Буравлев**, Г.Э. Цырлин, Ю.Б. Самосоненко, А.И. Хребтов, В.Н. Неведомский, П.Н. Брунков, В.Ф. Сапега, В.М. Устинов/ МПЭростисвойстваквантовыхточекнаоснове (In,Mn)Asполупроводниковыхсоединений// Тезисы докладов XI Российской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 16 – 20 сентября, 2013, с. 320.
- A54. **А.Д. Буравлев**, Н.В. Сибирев, Д.В. Безнасюк, Н. Лебедева, С. Новиков, Х. Липсанен, Г.Э. Цырлин/ Определение модуля Юнга (Ga,Mn)As ННК// Тезисы докладов XI Российской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 16 – 20 сентября, 2013, с. 461.