

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**на диссертацию Буравлева Алексея Дмитриевича “Молекулярно-пучковая эпитаксия и свойства полупроводниковых магнитных наноструктур”, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.01–приборы и методы экспериментальной физики и 01.04.10 – физика полупроводников**

### **Актуальность темы**

В настоящее время для получения наноструктур используют самые разнообразные методы. Среди них особое внимание привлекают методы, основанные на их самоорганизации. Поэтому изучение процессов роста при молекулярно-пучковой эпитаксии нитевидных нанокристаллов и квантовых точек представляет особый интерес не только для создания новых приборов, но и для исследования фундаментальных основ формирования низкоразмерных структур. С другой стороны, синтез полупроводниковых соединений, обладающих магнитными свойствами, имеет первоочередное значение для создания принципиально новых приборов, работа которых базируется на использовании спиновой степени свободы носителей заряда. Вышесказанное определяет безусловную актуальность темы диссертации Буравлева А.Д., цель которой состояла в разработке как технологических процессов эпитаксиального роста, так и в исследовании свойств полупроводниковых магнитных наноструктур таких, как Ge, MnP, Mn<sub>2</sub>P, (Ga,Mn)As нитевидные нанокристаллы (ННК) и (In,Mn)As квантовые точки.

### **Основные научные результаты и их новизна**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

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

Первая глава представляет собой обзор литературы, посвященный магнитным наноструктурам.

Во второй главе приводятся данные по синтезу и исследованию свойств нитевидных нанокристаллов на основе германия и фосфидов марганца.

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

В заключительной главе приводятся результаты исследования квантовых точек на основе разбавленных магнитных полупроводников (In,Mn)As.

В диссертационной работе получен целый ряд результатов, отличающихся существенной новизной и практической значимостью, среди которых следует выделить следующие:

1. Показано, что с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии при использовании крекингового источника для получения потока димеров фосфора могут быть синтезированы Ge, Mn<sub>2</sub>P, 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. 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 310 К.
3. 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.
4. Установлено, 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.
5. 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<sup>5</sup> оболочки Mn со связанными дырками, вследствие занятия атомами Mn в кристаллической подрешетке катионных мест.

Следует отметить, что диссертация является логически связанной и написана языком, доступным широкому кругу специалистов в области физики полупроводников. Достоверность полученных результатов, а также положений выносимых на защиту подтверждается использованием большого числа разнообразных экспериментальных методик. Не вызывает сомнений, что результаты, полученные в диссертационной работе, могут послужить основой для создания принципиально новых приборов на основе магнитных нитевидных нанокристаллов и квантовых точек.

Работы, послужившие основой диссертации, опубликованы в реферируемых журналах и докладывались на международных и отечественных конференциях. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Тематика диссертации соответствует специальностям 01.04.01 (приборы и методы экспериментальной физики) и 01.04.10 (физика полупроводников).

### **Замечания**

1. В диссертации большое внимание уделяется вопросам, связанным с внедрением атомов Mn как в нитевидные нанокристаллы, так и в квантовые точки. Однако приведенные в диссертационной работе результаты исследования наноструктур с помощью просвечивающей электронной микроскопии (в том числе с высоким разрешением) не позволяют определить распределение атомов Mn внутри синтезированных наноструктур. Тем не менее, мне кажется, что проведение данных исследований является возможным при использовании метода томографического атомного зонда.
2. Из диссертации не до конца ясно, какой дизайн приборных структур на магнитных нитевидных нанокристаллах может быть использован на практике.
3. Несмотря на то, что работа в целом написана хорошо, в тексте присутствует ряд пунктуационных ошибок.

Отмеченные замечания не снижают оценку диссертации в целом. Работа выполнена на высоком научном уровне с использованием большого количества оригинальных физических методик и хорошо оформлена.

### **Заключение**

Считаю, что диссертационная работа А.Д. Буравлева «Молекулярно-пучковая эпитаксия и свойства полупроводниковых магнитных наноструктур» по своей актуальности, новизне и

практическому значению полученных результатов соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям согласно «Положению о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Буравлев Алексей Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики и 01.04.10 – физика полупроводников.

Ведущий научный сотрудник

ФГБУН Института физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН),  
доктор физико-математических наук



А.И. Якимов

3 марта 2014 г.

Подпись А.И. Якимова заверяю  
ученый секретарь ИФП СО РАН  
кандидат физико-математических наук



А.В. Каламейцев