

О Т З Ы В

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.

Спинтроника – одно из интенсивно развиваемых направлений физики и квантовой электроники. Исследования металлических спинтронных устройств в ряде случаев уже дошли до приложений и применений. Полупроводниковая спинтроника находится в стадии осмысления: разрабатываются фундаментальные основы, ведется поиск подходящих материалов, в том числе и наноматериалов для этих целей. Именно в наноматериалах могут в полной мере проявиться квантовые явления, лежащие в основе функционирования будущих спинтронных устройств. Их изучение уже привело к открытию целого ряда новых явлений или обнаружению новых особенностей в уже известных эффектах. В этой связи актуальной является диссертационная работа Буравлева А.Д., направленная на разработку технологии формирования полупроводниковых магнитных наноструктур - нитевидных нанокристаллов и квантовых точек, и изучение их физических свойств.

Диссертационная работа содержит введение, четыре главы и заключение.

Во введении излагаются все формальные аспекты, присущие соответствующему разделу диссертационной работы: актуальность затронутых в работе проблем, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы в целом. Перечисляются цели и решаемые задачи, а также приводятся положения, выносимые на защиту.

Несмотря на множество работ, посвященных данной тематике, процессы, лежащие в основе ферромагнитного упорядочения в данных системах, до сих пор вызывают множество вопросов. В **первой главе** диссертационной работы приведен подробный обзор литературы по теме исследований, затрагивающий аспекты, связанные как с формированием, так и свойствами магнитных нитевидных нанокристаллов и квантовых точек. При этом особое внимание уделяется свойствам разбавленных магнитных полупроводников на основе $(A_3, Mn)B_5$ соединений, составившим предмет исследований данной диссертационной работы.

Вторая глава посвящена синтезу и исследованию свойств нитевидных нанокристаллов на основе германия и фосфидов марганца. Следует отметить, что нитевидные кристаллы на основе фосфида марганца были синтезированы впервые при использовании метода молекулярно-пучковой эпитаксии. При исследовании процессов роста этих наноструктур был обнаружен принципиально новый механизм формирования нитевидных нанокристаллов, при котором источником материала служит сама подложка. Подробное изучение Буравлевым А.Д. свойств

синтезированных образцов показало, что они проявляют ферромагнитные свойства до температур порядка 310 К. Делаются выводы о роли нанокластеров на основе Mn как катализаторов роста германиевых нанокластеров. Обсуждается механизм самоиндуцированного роста Mn:P нанокластеров.

В **третьей** главе диссертации содержится детальная информация о результатах исследования процессов МПЭ роста нитевидных нанокристаллов на основе разбавленных магнитных полупроводниковых соединений типа (Ga,Mn)As, так и исследованию их свойств с помощью различных экспериментальных методик. Обычно МПЭ синтез (Ga,Mn)As тонких пленок проводится при пониженных ростовых температурах для того, чтобы предотвратить образование кластеров с большим содержанием Mn или различных фаз типа MnAs. В свою очередь, Буравлевым А.Д. было показано, что синтез (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов может быть осуществлен при гораздо более высоких температурах порядка 420-660°C с использованием в качестве катализатора роста Mn. Исследования влияние потока мышьяка на процессы роста нитевидных нанокристаллов позволило определить закономерности, лежащие в основе их формирования. Безусловно, оригинальным представляется предложение Буравлева А.Д. по определению значения модуля Юнга (Ga,Mn)As нитевидных нанокристаллов на основе возбуждения и регистрации акустических колебаний с помощью растрового электронного микроскопа, хотя осталось недосказанным, можно ли это было сделать известными ранее методами.

Намагниченность образцов нанокристаллов исследовалась Буравлевым А.Д. как путем измерения сопротивления Холла, так и оптическими методами. Использование специально разработанной методики для изучения магнитных свойств самих (Ga,Mn)As НКК позволило установить, что они проявляют ферромагнитное упорядочение до температур порядка 70К. Однако, к сожалению, это значение далеко еще от комнатной температуры. На основании данных, полученных при исследовании образцов с помощью методики горячей фотолюминесценции, делается вывод, что при росте (Ga,Mn)As НКК атомы Mn занимают катионные позиции в кристаллической решетке, хотя объяснение обоснованности такого вывода не мешало бы изложить в более развернутой форме.

Было выполнено изучение электрофизических свойств одиночных нитевидных нанокристаллов на основе (Ga,Mn)As. Для этого Буравлевым А.Д. была разработана приемлемая для такого столь деликатного объекта, как одиночный (Ga,Mn)As нитевидный нанокристалл, методика нанесения контактов. Тем самым, по-сути, был создан макетный образец, который может быть использован в качестве прототипов различных приборов на одиночных нитевидных нанокристаллах.

Последняя, **четвертая**, глава диссертационной работы посвящена исследованию квантовых точек (In,Mn)As. Для их синтеза Буравлевым А.Д. была использована, в том числе, методика селективного легирования Mn. Показано, что полученные таким образом квантовые точки обладают высоким кристаллическим

качеством, и Mn тому не помеха. Выводы о магнитных свойствах образцов с (In,Mn)As квантовыми точками сделаны на основании измерений фотолюминесценции в магнитном поле.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить новизну и безусловно высокий уровень полученных результатов, достоверность, основанную на использовании различных экспериментальных методов и подходов к их анализу, а также их значимость для науки и практики, высокий научно-методический уровень ее выполнения, значительный объем проведенных Буравлевым А.Д. исследований. Продемонстрированы новые высокие технологии формирования магнитных полупроводниковых наноструктур. По результатам данной работы предстоит осмыслить перспективы создания новой наноэлементной базы спинтроники и оптоэлектроники.

Хотел бы привести и ряд замечаний, возникших при анализе диссертационной работы Буравлева А.Д.

1. В работе не приведена четкая мотивация необходимости перехода от объемных магнитных полупроводников к нанокристаллам в интересах развития спинтроники.
2. Новизну положения 2, выносимого на защиту, необходимо уточнить: кажется, что утверждение об участии подложки в формировании нанокластеров является тривиальным, принимая во внимание нарушение стехиометрии приповерхностных слоев InP в пользу In (за счет испарения P) при нагреве пластин до не слишком высоких температур (300 – 400 °C).
3. Не оптимальной представляется структура работы, поскольку обзор литературы занимает слишком значительную ее часть: 68 страниц против 91 страницы оригинальной части.
4. Глава 4 выглядит конспективно, рисунки и прочие экспериментальные данные мало обсуждены. В этом плане характерна незаконченная фраза на стр.169: «Изучение оптических свойств образцов, проведенное с помощью методики ГФЛ (см. 3.3.2.) при температуре 3 К.»

Далее – ряд мелких замечаний, в т.ч. стилистического характера.

5. В подписях к некоторым рисункам (см. Рис. 2.1., Рис.2.5., Рис. 2.16., Рис. 4.5, Рис. 4.8.) и к Таблице 2 нет расшифровки всех приведенных обозначений.
6. Стр. 34 – не очень удачное выражение «Хорошо известно, что обычные полупроводники в основном являются немагнитными материалами». Полупроводники типа GaAs являются диамагнетиками (как и кремний, и германий), и в этом плане они – магнетики. Также на Стр.91: «наиболее оптимальной температурой» - либо оптимальной, либо наиболее подходящей.
7. Оценка подвижности, сделанная на стр.154. – ошибочна: при проводимости $87 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ и при уровне легирования $3.5\cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ подвижность составляет $\approx 16 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а не $160 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, как приведено на стр.154.

Высказанные замечания побуждают диссертанта к дискуссии, но не снижают общую положительную оценку работы. Автореферат и опубликованные автором работы отражают содержание диссертации. Работа прошла апробацию на целом ряде международных и всероссийских конференций и симпозиумах. Тема диссертации и ее содержание соответствуют, по совокупности, специальностям 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики и 01.04.10 – физика полупроводников.

Диссертационная работа «Молекулярно-пучковая эпитаксия и свойства полупроводниковых магнитных наноструктур» полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям согласно критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Буравлев Алексей Дмитриевич, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики и 01.04.10 – физика полупроводников.

Официальный оппонент
директор Института физики микроструктур РАН,
профессор, доктор физ.-мат. наук
лауреат Государственной премии СССР



З.Ф. Красильник

10 марта 2014 года