

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



имени

П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

119991, ГСП-1, Москва,
Ленинский проспект, 53, ФИАН

Телефоны: (499) 135 1429

(499) 135 4264

Телефакс: (499) 135 7880

<http://www.lebedev.ru>

postmaster@lcbcddev.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Физического института им. П.Н. Лебедева

Российской академии наук (ФИАН)

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Н.Н. Колачевский

«6» июля 2021 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Некрасова Сергея Васильевича «Оптическая ориентация спинов в полупроводниковых квантовых точках $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ и $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Спиновая степень свободы носителей заряда в твердотельных системах во многом определяет их оптические и электронные свойства. Кроме того, спин рассматривается в качестве перспективного кандидата в квантовые биты для выполнения квантовых вычислений и передачи квантовой информации. В этом отношении наиболее перспективной системой являются квантовые точки (КТ), обеспечивающие контролируемую локализацию электронов и дырок. В КТ подавлен механизм спиновой релаксации, связанный со спин-орбитальным взаимодействием и время жизни спина может быть весьма значительным. Это определяет **актуальность** работы С.В. Некрасова, которая посвящена исследованию оптической ориентации и релаксации спинов электронов и дырок, а также экситонных комплексов в КТ $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ и $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$. Работа отличается тщательностью проведения и описания экспериментов, полнотой и обоснованностью их интерпретации. Результаты, полученные в работе, являются новыми и представляют как фундаментальную, так и практическую ценность.

Диссертационная работа С.В. Некрасова состоит из введения, 4 глав, выводов и списка использованных источников литературы, содержащей 62 наименования. Общий объем диссертации составляет 86 страниц, включая 28 рисунков.

В первой главе приведено описание экспериментальных методов, использованных в работе. Описана установка по исследованию спектров фотолюминесценции с разрешением по поляризации, а также с временным разрешением. Также приведено описание исследованных образцов КТ, приведены их спектры фотолюминесценции.

Вторая глава посвящена исследованию отрицательной циркулярной поляризации (ОЦП) в КТ $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$. Подробно обсуждаются механизмы возникновения ОЦП. Исследуется влияние магнитного поля на ОЦП, в том числе на ее динамику. Обнаружено подавление ОЦП поперечным магнитным полем, что связано с оптической ориентацией резидентных электронов. Также исследована динамика ОЦП в поперечном магнитном поле.

В третьей главе исследовано влияние поляризации ядерных спинов на спиновую поляризацию носителей заряда в КТ $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$, в частности на ее динамику. Отдельно исследуется влияние динамической поляризации ядер, которая наводится за счет оптической ориентации электронных спинов и дает вклад в результирующее магнитное поле, действующее на спин электрона. Также подробно исследовано влияние случайных ядерных флуктуаций на спиновую динамику электронов.

В четвертой главе исследуется ансамбль $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ КТ, имеющих очень интересную зонную структуру. Часть КТ этого ансамбля являются прямозонными, вторая, большая, часть КТ имеют непрямой переход в импульсном пространстве и, как следствие, длинное время жизни экситона в КТ. В этой системе подробно исследованы спектры люминесценции в зависимости от энергии возбуждающего лазера. Обнаружен эффект выстраивания экситонов, который проявлялся в линейной поляризации их излучения при их возбуждении светом линейной поляризации. Этот эффект наиболее ярко проявляется для прямозонных КТ, тогда как для непрямозонных КТ преобладает циркулярная поляризация.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Наиболее значимыми результатами диссертационной работы С.В. Некрасова являются:

1. Отсутствие осцилляций в динамике ОЦП $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ КТ, что связывается с малостью и разбросом g факторов дырки, спин которой определяет наблюдаемую поляризацию, в то время как спины электронов в отрицательно заряженном трионе скомпенсированы.

2. Наблюдение динамической поляризации ядерных спинов $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ КТ, которая проявлялась в монотонно затухающей компоненте в динамике электронной спиновой поляризации. Вместе с тем обнаружено, что ядерная поляризация не дает вклада в частоту прецессии Лармора для электрона. Это яркое противоречие было разрешено учетом вклада как отрицательно, так и положительно заряженных трионов в спиновую поляризацию.

3. Обнаружение эффекта выстраивания экситонов в $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ КТ при их возбуждении линейно поляризованным светом, а также обнаружение высокой степени циркулярной поляризации в непрямозонных КТ, свидетельствующей о длинном (более 10 микросекунд) времени спиновой релаксации электронов.

4. Обнаружение подавления линейной поляризации и одновременного увеличения степени циркулярной поляризации излучения $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ КТ при приложении магнитного поля. Из этих данных было определена константа обменного взаимодействия между электроном и дыркой.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы достигнута использованием современного научного оборудования, физической обоснованностью используемых автором подходов, а также согласованностью полученных данных с известными результатами, относящимися к спиновой физике в полупроводниковых КТ. Материалы диссертации прошли апробацию на российских и международных конференциях и семинарах и опубликованы в рецензируемых научных журналах из перечня, утвержденного ВАК.

Работа С.В. Некрасова представляет несомненный фундаментальный и **практический** интерес. Результаты исследований могут быть использованы в ФИАН (Москва), в МГУ им. М.В.Ломоносова (Москва), Институте физики твердого тела РАН (Черноголовка), Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова (Новосибирск), Институте физики микроструктур РАН (Нижний Новгород) а также в других организациях, занимающихся полупроводниковыми наноструктурами и разработкой приборов на их основе.

По работе С.В. Некрасова можно сделать следующие замечания:

1. Спектр фотолюминесценции и спектр циркулярной поляризации для $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ приводятся в главе 1. При этом во второй и третьей главах обсуждается зависимость степени циркулярной поляризации от различных параметров: мощности, энергии возбуждения, магнитного поля, времени, при этом спектры циркулярной поляризации не приводятся. Полезно было бы показать, как меняется форма спектра циркулярной поляризации при изменении этих параметров.

2. Во второй главе на рис. 2.9 приведена динамика степени циркулярной поляризации в сравнении с динамикой интенсивности фотолюминесценции, которая характеризуется быстрым и медленным участком. При этом автор обсуждает лишь динамику спада ОЦП, при этом нарастание ОЦП происходит за конечное время сравнимое со временем затухания быстрого участка фотолюминесценции. Механизм этого нарастания не обсуждается.

3. Не всегда введены и объяснены понятия незнакомые неспециалистам в этой области, например поле Оверхаузера, эффект Ханле. В третьей главе недостаточно подробно описан механизм динамической поляризации ядер, в частности, нет упоминания о поле Найта, играющем ключевую роль в этом процессе.

Стоит отметить, что приведенные замечания не умаляют значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы. В целом, диссертационная работа С. В. Некрасова является законченным научным исследованием, содержит новые результаты, имеющие большую научную значимость и практическую ценность. По материалам диссертации опубликовано 4 работы в изданиях, входящих в перечень ВАК, индексируемых в базах РИНЦ, Scopus и Web of Science (3 из 4-х) и 6 тезисов, вошедших в сборники научных трудов международных и российских конференций.

Автореферат достоверно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Работа С. В. Некрасова на тему «Оптическая ориентация спинов в полупроводниковых квантовых точках $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ и $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ » отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 "Физика конденсированного состояния" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Некрасов Сергей Васильевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составлен старшим научным сотрудником, исполняющим обязанности заведующего Лабораторией спиновой физики двумерных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), кандидатом физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния Белых Василием Валерьевичем.

Доклад С. В. Некрасова по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре Отделения физики твердого тела (ОФТТ) ФИАН 02 июля 2021 г. Отзыв на дис-

сертационную работу одобрен на заседании Ученого совета ОФТТ ФИАН, протокол №07/21 от 02 июля 2021 г.

Старший научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего Лабораторией спиновой физики двумерных материалов ОФТТ ФИАН, кандидат физико-математических наук тел. 8(499)132-65-49, belykh@lebedev.ru

Белых Василий Валерьевич

Главный научный сотрудник, исполняющий обязанности руководителя ОФТТ ФИАН, доктор физико-математических наук тел. 8(499)135-41-74, demihovei@lebedev.ru

Демихов Евгений Иванович

Подписи В.В. Белых и Е.И. Демихова заверяю:
и.о. ученого секретаря ФИАН
кандидат физико-математических наук



Кривобок Владимир Святославович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Россия, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, тел. 8(499)135-42-64, факс 8(499)135-78-80, <http://www.lebedev.ru/>; postmaster@lebedev.ru