

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических, профессора Тимошенко Виктора Юрьевича
на диссертационную работу Ерёмина Тимофея Владимировича
“Лазерная оптическая спектроскопия допированных одностенных углеродных нанотрубок”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – “Лазерная физика”

В диссертационной работе Ерёмина Т.В. методами лазерной спектроскопии исследуются одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), допированные с использованием двух различных методик. Оптические свойства ОУНТ активно исследуются на уже на протяжении двух десятилетий, а в последние годы можно наблюдать повышенный интерес к оптическим свойствам допированных ОУНТ, обусловленный, с одной стороны, перспективой практических применений допированных ОУНТ в области фотоники и лазерной физики, а с другой стороны, возможностью исследования фундаментальных многочастичных корреляционных явлений в таких наноструктурах. Таким образом, можно утверждать о высокой актуальности выбранной темы исследования.

Диссертация по своей структуре состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации составляет 112 страниц и содержит 64 рисунка.

Во введении приведено обоснование актуальности выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, обоснована научная новизна и значимость полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

В первой главе диссертации проводится подробный анализ научной литературы по теме исследования. Начиная с базовых представлений о кристаллической и электронной структуре ОУНТ, автор далее переходит к обзору экспериментальных и теоретических работ, исследующих влияние допирования на оптические свойства ОУНТ. Уделяется особое внимание сопоставлению опубликованных данных о структуре энергетических уровней в ОУНТ, допированных различными методами. В конце литературного обзора формулируются открытые вопросы, на решение которых направлены проведенные автором экспериментальные исследования.

Глава 2 посвящена исследованию ОУНТ, допированных за счет заполнения их внутренних полостей нанокристаллами хлорида меди. Несомненным преимуществом проведенного исследования являются наблюдения спектров резонансного комбинационного рассеяния света (КРС) непосредственно в ходе процесса заполнения

ОУНТ. Такая оригинальная адаптация метода лазерной КРС спектроскопии позволила, во-первых, исследовать детали механизма газофазного заполнения ОУНТ, в частности, установить, что допирование наступает уже в горячей фазе, а не только как результат финальной кристаллизации при остывании, а во-вторых, добиться выполнения условия “при прочих равных”, при ответе на вопрос о связи диаметра ОУНТ и эффективности ее заполнения, исключив вариацию параметров, обусловленных методом синтеза ОУНТ.

В главе 3 представлены результаты комплексного исследования ОУНТ, допированных в соляной кислоте, проведенного с привлечением набора лазерных, в т.ч. фемтосекундных, спектроскопических методов. Наиболее значимым результатом главы 3 является обнаружение сразу двух энергетических уровней (экситонного и трионного), возникающих в структуре энергетических уровней ОУНТ при допировании в соляной кислоте. Важно отметить, что именно использование фемтосекундного временного разрешения в экспериментах “накачка-зондирование”, а также использование различных длин волн возбуждения фотолюминесценции ОУНТ позволило обнаружить и идентифицировать эти энергетические уровни. Другие результаты, полученные в главе 3, касаются свойств этих дополнительных уровней, в частности, выявлена особо высокая чувствительность энергии дополнительного экситонного уровня к локальной окружающей среде и установлен механизм заселения трионного энергетического уровня.

Наряду с отмеченными выше несомненными достоинствами диссертационной работы Ерёмкина Т.В. в ней присутствуют отдельные принципиальные недостатки, в связи с которыми можно сделать следующие замечания:

1. В работе приводятся результаты измерений только при комнатной температуре, в то время как, оптическая спектроскопия при низких температурах могла бы дать возможность более точной идентификации электронных и колебательных состояний в исследуемых объектах.
2. При анализе изменений, возникающих в структуре энергетических уровней одностенных углеродных нанотрубок при их выдержке в соляной кислоте, делается вывод о преимущественном влиянии ионов водорода, то есть протонов, что, однако, не доказывается сравнительными экспериментами по протонированию в других средах, например, других кислотах, где можно было бы ожидать аналогичных эффектов.
3. При интерпретации данных по влиянию легирования на оптические свойства одностенных углеродных нанотрубок почему-то не обсуждаются возможные проявления эффекта Фано в комбинационном рассеянии света и оже-

рекомбинации в фотолюминесценции. В то же время, для многих полупроводниковых материалов и наноструктур роль таких эффектов значительно возрастает с ростом концентрации в них свободных носителей заряда.

4. В работе влияние легирования на электронные состояния в одностенных углеродных нанотрубках исследуется в основном методами спектроскопии фотолюминесценции и лазерной фемтосекундной спектроскопии наведенного поглощения, результаты которых, безусловно, указывают на изменения в структуре энергетического спектра изучаемых объектов после легирования, однако, не позволяют количественно определить число новых электронных состояний и связанных с ними свободных носителей заряда (электронов и дырок). При этом хорошо известный метод измерения поглощения света в ИК области на свободных носителях заряда, который мог бы дать количественные характеристики, например, определить концентрации носителей заряда, почему-то не используется и не обсуждается.
5. В названии и в тексте диссертации используется термин «допирование», хотя в русскоязычной научной литературе для описания изменения электронных свойств полупроводников более принято использовать термин «легирование». В этой связи не понятно, используется ли в работе термин «допирование», чтобы каким-то образом подчеркнуть особый характер изменения электронных свойств исследуемых объектов по сравнению с другими полупроводниковыми структурами, или же это просто эквивалентный термин, заимствованный из англоязычной литературы.

Указанные выше замечания несколько не умаляют общую высокую оценку работы Ерёмина Т.В., а скорее носят характер пожеланий для дальнейшего развития исследований в данном направлении.

Диссертация Ерёмина Т.В. отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.21 – «Лазерная физика», а также критериям, определённым пп. 2.1 – 2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова, соответствует критериям «Положения о порядке присуждения учёных степеней ВАК (утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842)». Диссертационная работа оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о

диссертационном совете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Диссертация Ерёмина Т.В. является законченной научной работой. Её основные выводы опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Автор работы, Ерёмин Тимофей Владимирович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики низких
температур и сверхпроводимости
физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова

Тимошенко Виктор Юрьевич

Контактные данные:

Тел. +7 495 939-46-81

timoshen@physics.msu.ru

Специальность, по которой защищена диссертация

01.04.10 - Физика полупроводников

Адрес места работы:

119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, кафедра физики низких температур и сверхпроводимости,

Тел. +7 495 939-16-82

Электронный адрес: info@physics.msu.ru

<http://phys.msu.ru>

Подпись профессора кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ им М.В. Ломоносова Тимошенко Виктора Юрьевича удостоверяю:

Декан физического факультета
МГУ им. М. В. Ломоносова,
профессор

Сысоев Н. Н.

«26» октября 2021 г.