



**МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**  
имени  
**М.В. ЛОМОНОСОВА**  
(МГУ)

Ленинские горы, Москва,  
ГСП-1, 119991  
Тел.: 939-10-00, 203-65-65  
Факс: 939-01-26

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_

“Утверждаю”

Проректор Московского государственного университе-  
та имени ~~М.В. Ломоносова~~

*А.А. Федянин*  
А.А. Федянин

2015 г.

### О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Насретдиновой В.Ф. на тему: «Фотоэлектрическая спектроскопия квазиодномерных соединений  $p\text{-TaS}_3$ ,  $\text{NbS}_3(\text{I})$  и  $\text{K}_{0.3}\text{MoO}_3$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Одним из магистральных направлений развития современной физики конденсированного состояния является физика сильнокоррелированных электронных систем. Неустойчивость электронного спектра, характерная для такого рода систем, проявляется в возникновении целого ряда сильных эффектов, таких как высокотемпературная сверхпроводимость, колоссальное магнитосопротивление, возникновение тяжелых фермионов, и других. Особый интерес представляют квазиодномерные системы, в которых наблюдаются такие необычные коллективные электронные явления как волна зарядовой плотности (ВЗП). Помимо несомненного фундаментального интереса, некоторые из указанных эффектов имеют перспективу практического применения в электронике. В то же время многие фундаментальные вопросы, в частности, связанные с рассмотрением фотопроводимости в квазиодномерных проводниках, остаются невыясненными. Именно этим вопросам и посвящена диссертационная работа В.Ф. Насретдиновой, что свидетельствует о ее несомненной актуальности.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения с основными результатами работы, благодарностей и списка цитированной литературы. Мате-

риал диссертации изложен на 162 страницах и содержит 59 рисунков, 4 таблицы и 133 наименование цитируемых источников. Основные выводы каждой главы изложены в конце соответствующего раздела.

Во введении приводится обоснование актуальности исследований, сформулирована цель работы, поставлены конкретные задачи. Обсуждается научная новизна, практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации является литературным обзором, отражающим общую характеристику квазиодномерных проводников и содержащую теоретические и экспериментальные результаты исследования их физических свойств. Изложена общая информация, дающая представление о квазиодномерных соединениях, волне зарядовой плотности и пайерлсовской щели, далее дан краткий обзор теоретических работ, посвященных эффектам, влияющим на плотность электронных состояний в области энергий вблизи края пайерлсовской щели. Рассмотрено влияние флуктуаций, солитонных состояний внутри пайерлсовской щели, влияние примесей и неидеального нестинга. После этого сформулированы проблемы экспериментальных методик исследования плотности состояний в этой области энергий и приведены сведения об изучаемых соединениях, включая обзор экспериментальных результатов об изучении пайерлсовской щели в  $p$ -TaS<sub>3</sub> и K<sub>0.3</sub>MoO<sub>3</sub>, а также щелевого состояния в NbS<sub>3</sub>(I). Глава завершается разделом, посвященным особенностям фотопроводимости квазиодномерных соединений, приводятся данные о временах релаксации и обсуждаются причины наблюдаемой немонотонной температурной зависимости. Перечислены эффекты, способные повлиять на отклонение спектров фотопроводимости квазиодномерных соединений от ожидаемой обратной корневой зависимости от энергии фотонов.

Вторая глава работы посвящена описанию методики изготовления образцов исследуемых соединений и использованных измерительных методик. Приведены методики синтеза кристаллов  $p$ -TaS<sub>3</sub> и NbS<sub>3</sub>, описаны условия синтеза разных фаз соединения NbS<sub>3</sub> и кратко охарактеризованы полученные кристаллы. Излагается методика легирования индием кристаллов квазиодномерных проводников. Изложена методика измерения спектров фотопроводимости.

В третьей главе диссертации, являющейся ключевой, приводятся результаты фотоэлектрической спектроскопии ромбического TaS<sub>3</sub>. Показано, что спектры фотопроводимости различных номинально чистых образцов  $p$ -TaS<sub>3</sub> довольно сильно отличаются друг от друга в области энергий  $E < 0.3$  эВ. В то же время при больших энергиях харак-

тер изменения спектра близок к обратной корневой зависимости плотности состояний, ожидаемой для одномерных систем. Установлено, что величина пайерлсовской щели при составляет не менее 0.2 эВ. Показано, что вариации в величине щели в различных образцах превышают характерные отличия, связанные с температурной зависимостью спектров в исследуемом диапазоне температур, проявляющейся в малом сдвиге края спектра без его размытия, и не связаны с влиянием электрического поля. Исследование влияния легирования индием на спектры фотопроводимости образца высокого качества позволило доказать связь вариаций спектров фотопроводимости с влиянием примесей и определить величину пайерлсовской щели. Установлено, что отличия в спектрах фотопроводимости образцов при энергиях в области 0.15-0.25 эВ связаны с внутрищелевыми состояниями и вызываемым ими размытием спектра. Размытие спектра в области 0.2-0.25 эВ характеризует качество образца. Обсуждаются зависимости вклада в фотопроводимость, связанного с внутрищелевыми состояниями, от поляризации излучения и от дополнительной подсветки. Характер зависимостей согласуется с коллективными механизмами возникновения внутрищелевых состояний данного типа.

Четвертая глава диссертации посвящена результатам, полученным методом фотоэлектрической спектроскопии, на некоторых других квазиодномерных материалах – голубой бронзе  $K_{0.3}MoO_3$ , а также  $NbS_3(I)$ . Показано, что для  $K_{0.3}MoO_3$  величина оптической щели  $2\Delta = 0.11$  эВ находится примерно посередине интервала 0.08–0.15 эВ, задаваемого литературными данными. Внутрищелевые состояния при этом не обнаружены. Установлено, что спектры фотопроводимости  $NbS_3(I)$  состоят из спада, соответствующего краю щели, и воспроизводимых особенностей внутри щели, которые зависят от приложенного электрического поля и температуры. Спектры разных образцов совпадают с хорошей точностью, и практически все отличия связаны с разной степенью выраженности особенностей при энергиях менее 1 эВ, то есть внутри щели. Особенности при энергиях фотонов  $E > 2\Delta$  хорошо описываются моделью с модуляцией щели в направлении поперек цепочек Nb. Кроме того, наблюдался пик фотопроводимости при энергии 0.6 эВ, находящийся практически в центре щели, где предсказывается существование солитонных состояний, связанных с ВЗП. Высказано предположение, что избыточные долгоживущие при низких температурах носители тока, взаимодействуя с возмущениями решетки в  $NbS_3(I)$ , создают автолокализованные состояния — солитонные уровни, предсказанные ранее для пайерлсовских проводников при энергиях, близких к половине величины щели. Обнаружено также, что пластическая деформация об-

разца приводит к изменениям в амплитуде пика при  $E = 0.6$  эВ. Пик полностью исчезает после изгибной деформации образца.

В заключении обсуждаются дальнейшие перспективы исследований и приведены основные результаты работы.

Результаты исследований, проведённых В.Ф. Насретдиновой, представляют несомненный практический интерес. Полученные в работе результаты рекомендуются к использованию в следующих организациях: МГУ им. М.В. Ломоносова, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФМ РАН (Нижний Новгород), ИФП СО РАН (Новосибирск), и в других институтах РАН и Министерства образования и науки.

Вместе с тем, по диссертации можно высказать ряд замечаний:

1) Поскольку все измерения в работе проводятся 2-зондовым методом, то чрезвычайно важным является экспериментальное доказательство того, что контакты являются омическими и что их сопротивление мало по сравнению с сопротивлением образца. Наиболее прямым доказательством такого рода было бы сравнение данных, полученных 2-зондовым и 4-зондовым методами. Было бы уместно привести результаты такого доказательства в диссертационной работе.

2) В работе стоило бы привести вид вольт-амперных характеристик (ВАХ) исследуемых образцов. Это необходимо для понимания того, в каком именно месте ВАХ производятся те или иные измерения. Это особенно важно ввиду того, что ВАХ исследуемых материалов являются сильно нелинейными.

3) Вообще говоря, фотопроводимость может быть неомической даже в случае, когда проводимость является омической. Хотелось бы видеть в работе соотношение омической и неомической части фотопроводимости, и связь этого соотношения с темновой ВАХ.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. В целом, исследование В.Ф. Насретдиновой удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сама автор заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доклад В.Ф. Насретдиновой заслушан на заседании кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ "17" февраля 2015 г., протокол №2. Отзыв подготовлен профессором Д.Р. Хохловым.

Зав. кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния  
физического факультета МГУ

член-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н.

Дмитрий Ремович Хохлов

Адрес: Ленинские горы, д.1, стр.2, Москва 119991

Тел. (495)-939-11-51

E-mail: khokhlov@mig.phys.msu.ru

Подпись Д.Р. Хохлова заверяю