

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора  
НИИ «Курчатовский институт»  
по науке

  
Ю.А. ДЬЯКОВА

«24» января 2024 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный  
исследовательский центр «Курчатовский институт»

на диссертационную работу

**Никонова Сергея Александровича**

«Динамика волны зарядовой плотности в  $NbS_3$  в ВЧ диапазоне»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного  
состояния»

#### Актуальность исследования

Изучение электронных систем с сильными электронными корреляциями представляет собой весьма актуальную область современной физики твердого тела. К этой области относятся и волны зарядовой плотности (ВЗП) в квазиодномерных проводниках и других соединениях пониженной размерности. Несмотря на почти 50-летнюю историю изучения ВЗП, некоторые базовые явления, такие как перенос заряда ВЗП, её формирование при пайерлсовском переходе, до сих пор не имеют общепризнанного универсального описания. Прогресс в понимании свойств ВЗП, механизмов её возникновения и скольжения, мог бы стать значимым вкладом в физику твердого тела.

Диссертация С.А. Никонова посвящена исследованию ВЗП в материале  $NbS_3$ , интерес к которому возник в последние годы. По многим параметрам используемая кристаллическая модификация  $NbS_3$  может стать фактически модельным объектом для изучения динамики ВЗП. Представленные в диссертации результаты, полученные для  $NbS_3$ , применимы для описания динамики волн зарядовой плотности в различных соединениях, в которых

наблюдается скольжение ВЗП. Актуальность полученных в диссертации результатов подтверждается также их публикацией в высокорейтинговых научных журналах.

### **Научная новизна**

Научная новизна исследования обусловлена выбором уникального соединения  $NbS_3$  в качестве объекта изучения. В отличие от многих исследований, проведенных ранее, в данных кристаллах  $NbS_3$  ВЗП существует при комнатной температуре и при этом отличается высокой степенью когерентности. В диссертации предложено и обосновано универсальное описание динамики ВЗП в условиях синхронизации её скольжения с высокочастотным электрическим полем. Это позволило дать детальное объяснение не только осцилляций ширины ступенек Шапиро (СПШ), но и объяснить природу осцилляций порогового поля  $E_c$ , обобщив картину осцилляционных явлений при движении ВЗП.

Исследование особенностей синхронизации скольжения ВЗП в окрестности пайерлсовского перехода (и даже выше) позволило определить характерное время жизни флуктуаций ВЗП и его температурную зависимость. Это, в свою очередь, позволяет экспериментально проследить динамику разрушения ВЗП при пайерлсовском переходе.

Стоит отметить новизну экспериментального подхода к поставленным задачам, а именно: инструментальное исследование перемещения ВЗП на масштабах длин порядка периода ВЗП, выяснение температурно-частотной зависимости плотности заряда, переносимого ВЗП, исследование эффектов синхронизации при подаче на образец с ВЗП напряжения на двух частотах.

### **Апробация работы и публикации**

Результаты работы были доложены на 12 российских и международных конференциях и были опубликованы в 7 научных статьях в журналах из перечня ВАК и в 4 сборниках тезисов докладов, индексируемых в РИНЦ. Четыре статьи изданы в высокорейтинговых научных журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus.

### **Достоверность результатов и обоснованность научных положений и выводов**

Результаты, представленные в диссертации, достоверны, так как они хорошо согласуются друг с другом, не противоречат известным ранее экспериментам и существующим теоретическим (модельным) представлениям. Измерения проведены в широком диапазоне частот накачки, температур и электрических полей. Данные подтверждены измерениями на нескольких образцах, и результаты имеют общий характер, не зависящий от выбора образца данной кристаллической модификации. Представленные методики модельных расчетов подробно описаны и достаточно очевидны, чтобы их можно было независимо повторить и проверить.

Основной вывод диссертации о том, что строгая периодичность колебаний ширины СШ обусловлена перемещением ВЗП за полупериод ВЧ поля, обоснован прежде всего тем, что был получен на трех различных соединениях и имеет достаточно общий характер для этой области знания. При этом прозрачность и красота представленной физической картины не оставляет у читателя сомнений в достоверности результатов и обоснованности выводов. Экспериментально найденная связь осцилляций ширины СШ и осцилляций  $E_1$  с перемещением ВЗП на длину, кратную целому периоду ВЗП, представляется органичной и логичной, если не единственно возможной. Удивительно, что такой очевидный подход к обработке экспериментальных данных не был применен ранее. Отметим, что достоверность данного результата и обоснованность вывода во многом проистекает из экспериментального наблюдения большого количества осцилляций (8 и более). Это следствие полной синхронизации движения ВЗП с внешним ВЧ полем и наблюдается в соединениях с высоко-когерентной ВЗП. Последнее есть следствие правильного выбора объекта исследования. Отметим, что большое количество осцилляций затрудняет искусственную подгонку экспериментальных данных под желаемый результат. Обоснованность примененного подхода также подтверждается модельным расчетом формы ВАХ в условиях ВЧ накачки. Расчетные значения хорошо совпадают с экспериментально измеренной зависимостью.

Эксперименты с двухчастотной накачкой подтвердили общую концепцию синхронизации ВЗП. Обоснованность вывода о том, что подпороговое движение ВЗП можно рассматривать как нулевую СШ, нашло свое подтверждение при рассмотрении  $n$ -ой СШ как нулевой, если перейти в систему отсчета, связанную с движущейся ВЗП. При этом осцилляции спутников подчиняются тем же закономерностям, что и основные пики. Достоверность вывода о синхронизации ВЗП вблизи и выше температуры пайерлсовского перехода подтверждается большим объемом полученных данных, которые находят логическое объяснение в рамках модели спонтанного проскальзывания фазы. Автор проанализировал нелинейную и квазичастичную компоненту проводимости и несколькими способами определил время жизни флуктуаций ВЗП, что позволило представить логично обоснованную картину пайерлсовского перехода.

### **Содержание диссертационного исследования**

Диссертационная работа содержит 78 страниц, состоит из введения, трех глав и заключения, включает в себя 31 рисунок. Список литературы содержит 51 публикацию. Материал размещен в диссертации последовательно, по мере развития основной концепции. Текст хорошо структурирован, выводы по главам и всей работе логически следуют из основного содержания диссертации. Поставленные в диссертации цели выполнены полностью. Основное содержание и выводы достаточно полно опубликованы в научной печати.

### **Значимость результатов**

Научная значимость работы определяется тем, что в ней исследуются фундаментальные свойства ВЗП, проявляющиеся при синхронизации её скольжения с внешним переменным полем ВЧ диапазона. Многократные осцилляции ширины СШ в

зависимости от ВЧ напряжения оказались строго периодическим по перемещению ВЗП за полпериода ВЧ сигнала. Фактически, данный, чисто экспериментальный, подход подводит к описанию эффекта синхронизации в терминах колебания ВЗП в периодическом потенциале пиннинга. Это, хотя и полуэмпирическое описание, позволило объяснить причину осцилляций ширины СШ.

Кроме научной значимости работы можно отметить её практическую ценность. Например, полученные результаты, могут быть использованы для создания на основе  $NbS_3$  наноразмерных детекторов-процессоров ВЧ-СВЧ излучения со спектральным разрешением, работающих при температурах вплоть до 360 К. При этом предложена универсальная для разных температур калибровка детекторов, позволяющая пересчитать ток в частоту. Автором сделана попытка использования осцилляций порогового поля для калибровки высокочастотного напряжения на образце в данной работе. Это позволяет избегать технических трудностей при прямом измерении. Такая процедура также применима для калибровки СВЧ напряжения на джозефсоновских переходах (С.Г. Зыбцев и др. Письма в ЖЭТФ, т.119, в.2, с.126, 2024).

### Замечания

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Автор уделил недостаточное внимание описанию методики электрических измерений. Приведенная электрическая схема не содержит номиналов элементов, паразитных и проходных емкостей, кабельной ВЧ разводки. Нет анализа работы эквивалентной электрической цепи с учетом реальной и мнимой части электропроводности образца. Процедура калибровки ВЧ напряжения на образце выполнена неизвестным прибором в ограниченном частотном диапазоне. Не приведена погрешность амплитуды ВЧ напряжения на образце, автор использует 3 значащих цифры, насколько это оправдано? Схема измерения при двухчастотной накачке не приведена.

2. Автор уделил недостаточное внимание описанию методики температурных измерений. Не описан способ теплопередачи к образцу (теплообменный газ, теплоотвод по элементам конструкции и т.п.). Нет оценки погрешности измерения и стабилизации температуры. Не понятно, что такое комнатная температура в представлении автора. На многих рисунках в 1 и 2 главах температура не указана. Не приведены данные или оценки возможности перегрева образца постоянным и переменным током при измерениях.

3. Автор уделил недостаточное внимание описанию методики манипуляции с короткими волокнами нанометровой толщины. Применение оптической микроскопии в таком случае обычно затруднено. Как была выполнена эта работа?

4. Автор не уделил внимания описанию такой важной характеристики ВЗП как длина когерентности в изучаемой фазе  $NbS_3$ . Как она соотносится с поперечным и продольным размером образцов. Оправдано ли использование коротких образцов с наноскопическими поперечными размерами.

5. Автор использует понятие 100% синхронизации ВЗП с высокочастотным излучением, при этом количественное определение уровня синхронизации не дано.

Остается непонятным «100% синхронизация» - это качественная или количественная характеристика? Достигается ли в эксперименте 100% синхронизация, что бы это ни значило?

6. Автором допущено несколько опечаток и технических погрешностей в тексте, например:

а) Основное содержание на рис.1.1 главы 1 было опубликовано ранее на рис.2 в работе [19]. Никонов С.А. не является членом авторского коллектива [19], поэтому необходима ссылка в подрисуночной подписи.

б) На рис.1.10 изображены 4 группы точек (кривых), а в подписи описаны только 3.

в) В главе 1 автор использовал в качестве обозначения основной высокой частоты накачки символ  $f$ , а в главе 2 этот символ использован для обозначения дополнительной низкой частоты, а первая переименована в  $F$ .

г) В главе 2 произошла путаница в обозначениях. В измерениях использовалась частота накачки  $F=400$  мГц. На рис 2.1-2.5 она записана со знаком «-», и, скорее всего, является идентификатором соответствующей СШ. Вместе с тем, записанное на стр. 37 условие наблюдения СШ « $f_j = \pm F \pm f, \pm F \pm 2f, \pm 2F \pm f, \text{ и } \pm 2F \pm 2f$ » позволяет предположить, что автор допускает отрицательные значения для фундаментальной частоты  $f_j$  и отрицательную частоту накачки, что является сомнительным нововведением.

Следует отметить, что данные замечания в целом не влияют на высокую оценку выполненного исследования.

### **Заключение**

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на достаточно высоком научном уровне. Работа соответствует паспорту специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния».

Диссертация является исследованием, выполненным автором самостоятельно и содержит ряд новых научных результатов и положений, выдвигаемых автором для публичной защиты.

Текст в целом написан ясным и грамотным языком и оформлен в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертационным работам. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Динамика волны зарядовой плотности в  $NbS_3$  в ВЧ диапазоне», удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Никонов Сергей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния».

Отзыв подготовлен кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником Отдела Ресурсных центров КК НБИКС-природоподобных технологий федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Талденковым Александром

Николаевичем.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании КК НБИКС-природоподобных технологий НИЦ «Курчатовский институт», протокол № 49 от «18» января 2024 года.

**Сведения о ведущей организации:** Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Адрес: 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Электронная почта: nrcki@nrcki.ru

Тел.: +7 (499) 196–7256

Сайт: <http://www.nrcki.ru>

Старший научный сотрудник отдела ресурсных центров Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий, к.ф.-м.н.

А.Н. Талденков

Первый заместитель руководителя по научной работе Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий, к.ф.-м.н.

В.А. Демин

Подписи В.А. Демина и А.Н. Талденкова удостоверяю

Главный учёный секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»



К.Е. Борисов

«13» января 2024 г.