Письма в ЖЭТФ, том 118, вып. 11, с. 854 – 859

О принципиальном отличии воздействия электрических и механических колебаний на динамику волны зарядовой плотности[1)]

М. В. Никитин, В. Я. Покровский[2)], *Д. А. Кай, С. Г. Зыбцев*

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 октября 2023 г.
После переработки 27 октября 2023 г.
Принята к публикации 29 октября 2023 г.

Сопоставлены эффекты воздействия электрических и деформационных высокочастотных полей на депиннинг и скольжение волны зарядовой плотности в квазиодномерном проводнике TaS_3. Для обоих типов полей исследованы зависимости величины порогового напряжения, V_t, (0-й ступеньки Шапиро) от амплитуды. Если с увеличением электрического высокочастотного поля, $E_{\rm rf}$, видна тенденция к ускорению снижения V_t – росту $|dV_t/dE_{rf}|$, с увеличением деформационного поля снижение V_t насыщается. Результат показывает качественное различие механизмов воздействия электрических и деформационных полей на динамику волны зарядовой плотности и объясняется тем, что в первом случае модулируется скорость скольжения волны зарядовой плотности, а во втором – потенциал пиннинга. В практическом плане, результат позволяет отличить механическое воздействие на динамику волны зарядовой плотности от воздействия электрических наводок на той же частоте.

DOI: 10.31857/S1234567823230118, EDN: mvnqyg

Один из характерных эффектов, наблюдаемых при скольжении волны зарядовой плотности (ВЗП) в квазиодномерных проводниках, – синхронизация с внешним высокочастотным (ВЧ) электрическим полем [1, 2]. Синхронизация выражается в появлении на ВАХ образцов в области полей выше порогового, E_t, так называемых ступенек Шапиро (СШ). В области СШ фундаментальная частота скольжения ВЗП в периодическом потенциале пиннинга (ППП), f_f, совпадает с частотой ВЧ поля f или с одной из ее гармоник или субгармоник. Если скольжение ВЗП происходит достаточно когерентно, т.е. в разных точках образца она двигается синфазно относительно ППП, наблюдаются многократные квазипериодические осцилляции величин СШ в зависимости от амплитуды ВЧ напряжения, V_{rf} [2–4]. В частности, наблюдаются осцилляции величины порогового напряжения V_t: ВАХ в области постоянных напряжений $|V_{dc}| < V_t$ можно рассматривать как 0-ю СШ [5].

В ряде квазиодномерных проводников наблюдаются электромеханические эффекты, связанные с взаимным влиянием деформаций ВЗП и решетки кристалла друг на друга. К их числу относятся снижение упругих модулей кристалла при депиннинге ВЗП [6], деформация кристалла при деформации ВЗП [7–9], особенности деформации орбразца в области СШ [10], вибрация образцов при скольжении ВЗП [11], в том числе, на частоте f_f [12]. Исследованы и тензорезистивные эффекты [13], в том числе – крутильная модуляция сопротивления [11, 14]. Наблюдался резкий рост тензосопротивления с ростом скорости движения ВЗП [11, 14]. Особым образом на динамику ВЗП воздействует *периодическая* деформация образца: обнаружено, что ВЧ механические колебания образца приводят к особенностям на ВАХ, имеющими вид СШ [15]. Наблюдалось и снижение V_t. Анализ ненулевых СШ показал, что они, как и в случае воздействия ВЧ электрического поля, возникают при условии совпадения частот колебаний образца с f_f [15] или близости к ней[3)]. Ниже, для краткости, мы будем называть наблюдаемые особенности "механическими" СШ.

Как видно из приведенных выше ссылок, наиболее полно электромеханические эффекты исследованы в квазиодномерном соединении TaS_3 ромбической фазы, для которого характерна сильная механическая связь ВЗП и решетки кристалла. В TaS_3 ВЗП формируется при 220 К, а наиболее удобный диапазон температур для исследования электромеханиче-

[1)]См. дополнительный материал к данной статье на сайте нашего журнала www.jetpletters.ac.ru

[2)]e-mail:vadim.pokrovskiy@mail.ru

[3)]Некоторое различие нелинейных токов в области механической и электрической СШ при одной и той же частоте было отнесено к пространственной неоднородности деформации образца. Это может приводить к синхронизации скольжения ВЗП не во всем объеме образца.

ских эффектов – 110–140 K. Ниже речь идет о свойствах именно этого соединения

В [15] отмечено, что механические СШ возникают при неожиданно малой амплитуде деформации образца, $\delta\varepsilon \sim 10^{-4}$. В рамках модели слабого пиннинга рассмотрен вопрос о причине столь сильного воздействия ВЧ деформации на динамику ВЗП ([16] и сноска 33 в [15]). Приведены качественные соображения о том, что деформации $\varepsilon \sim 10^{-4}$ достаточно для существенной перестройки ППП в TaS_3. Поскольку СШ можно рассматривать как колебания вокруг минимума ППП [5], сделан вывод о возможности наблюдения механических СШ при такой величине $\delta\varepsilon$. В то же время, вопрос об отличии механизмов воздействия электрических и деформационных колебаний на динамику ВЗП в [15, 16] не обсуждался.

Вместе с тем, научиться отличать воздействие механических ВЧ полей на ВЗП от электрических – интересная задача как с физической, так и с практической точек зрения. Пока что наблюдать СШ, будучи уверенным в их механическом происхождении, удалось только в конфигурации вискера, подвешенного между двумя пьезоактюаторами [15]. В этом случае совпадение частот синхронизации с собственными частотами колебательных мод образца доказывает, что наблюдаемые СШ не связаны с электрическими наводками. Для дальнейших исследований механических СШ хотелось бы освоить другие методики, позволяющие расширить амплитудные и частотные диапазоны деформации вискеров. Однако динамическая деформация образцов возбуждается, как правило, с помощью ВЧ электрического поля той же частоты, поэтому проблема выявления воздействия наводок на ВЗП стоит весьма остро. Так, в [17, 18] СШ и подавление порогового поля наблюдались при комнатной температуре на вискерах NbS_3, закрепленных на пластине из ниобата лития со встречно-штыревым преобразователем. Хотя эти особенности ВАХ наблюдались только при возбуждении поверхностной акустической волны (ПАВ) на резонансной частоте около 40 МГц, различить воздействия деформационного и электрического полей ПАВ на ВЗП пока не удалось (см. также ссылку 15 в [19]). Аналогичное затруднение возникло при интерпретации особенностей на ВАХ образцов NbS_3, закрепленных на пластине кварцевого резонатора [17, 18].

Недавно появилось несколько теоретических работ, анализирующих СШ механического происхождения [19–21]. В [21] сделан вывод, что ультразвуковые колебания должны приводить к возникновению преимущественно нечетных СШ (гармоник), что может позволить отличить их от обычных, электрических, СШ. Этот критерий, к сожалению, трудно применить к TaS_3, так как ВЗП в этом материале не обладает достаточной когерентностью, чтобы анализировать гармонический ряд механических СШ. Кроме того, в [19] отмечено, что в [21] сделаны некоторые недопустимые упрощения в описании пиннинга. В то же время, авторы [19] заметили некоторые другие отличия механических и электрических СШ.

Остановимся чуть подробнее на основных результатах [19]. В этой работе сравнительный анализ СШ акустического и электрического происхождения проведен в рамках классического описания ВЗП в модели Фукуямы–Ли–Райса [22–24]. При этом воздействие поля деформации на ВЗП учитывается в виде периодической по времени добавки к силе пиннинга. Отмечено отличие фрактальных размерностей систем СШ, индуцированных ПАВ и ВЧ электрическим полем. Проведены также расчеты амплитудных зависимостей величин электрических и механических СШ. Показано, что, если в зависимости от V_{rf} наблюдаются осцилляции величин СШ, с ростом амплитуды акустической волны наблюдается монотонный рост величины СШ с тенденцией к насыщению[4]. Аналогичный результат получен для 0-й СШ: V_t монотонно снижается с ростом амплитуды ПАВ (см. дополнительный материал к [19]).

Хотя результаты [19] получены в рамках одной из частных моделей динамики ВЗП, качественное различие амплитудных зависимостей величин механических и электрических СШ, очевидно, выходит за рамки модели Фукуямы–Ли–Райса. Если рассматривать синхронизацию с электрическим полем, для наблюдения СШ необходимо приложить напряжение V_{rf} больше или порядка V_{dc}: согласно [25], в режиме синхронизации ВЗП должна проводить часть времени в поле ниже E_t. Чтобы увидеть осцилляции величин СШ, необходимо приложить еще большее напряжение V_{rf}, которое приводит к движению ВЗП вперед-назад между соседними долинами ППП [5][5]. Очевидно, такое невозможно, если модулируется не сила, движущая ВЗП, а ППП. Аналогичное рассуждение применимо и к 0-й СШ. 1-й минимум V_t достигается, когда ВЗП колеблется вперед-назад на величину λ, 2-й – на 2λ, и т.д., где λ – период ППП (совпадающий, как правило, с периодом ВЗП). Модуляцию рельефа ППП, в каком-то смысле, можно свести к

[4] Некоторая немонотонность получилась в области больших амплитуд модуляции силы пиннинга, – более 100 %. Авторы [19] считают столь большие амплитуды нереалистичными.

[5] Эксперимент [5] показал, что номер минимума величины любой СШ совпадает с числом периодов ВЗП, которое она проходит в обратную сторону за полупериод ВЧ напряжения.

колебаниям ВЗП вокруг потенциального минимума, однако ясно, что в соседнюю долину ВЗП перебросить не получится, по крайней мере, если колебания перезатухающие. Из этих рассуждений следует, что осцилляции $V_t(\delta\varepsilon)$ вряд ли будут наблюдаться, как бы мы ни увеличивали $\delta\varepsilon$.

В данной работе сообщается об исследовании величины 0-й СШ в зависимости от амплитуд ВЧ поля и механических колебаний. Наблюдается качественное отличие зависимостей, в согласии с [19].

Измерения проведены на трех образцах TaS_3. Все данные в статье приведены на репрезентативном образце, имеющем ширину 1.5–2 мкм. Площадь сечения 0.5–1 мкм^2 мы оценили исходя из тока 1-й СШ и сопротивления при комнатной температуре. Длина подвешенной части образца – 700 мкм, расстояние между нанесенными на его поверхность золотыми контактами – 230 мкм. Для исследования воздействия динамической деформации образца на ВЗП мы использовали методику [15]. Образец подвешивался между двумя пьезоэлектрическим керамическим актюаторами, на которые подавалось ВЧ напряжение V_{act}, частоту которого обозначим f_{act}. Воздействие ВЧ деформации на вид ВАХ образца наблюдалось в тех случаях, когда в образце возбуждались колебания на одной из резонансных частот, f_0, т.е. при условии $f_{\mathrm{act}} = f_0$. Дополнительный эксперимент, в основе которого лежит методика гетеродинирования [26, 27], показал линейность зависимости амплитуды деформации TaS_3 от V_{act} (см. дополнительные материалы, рис. S1).

В данной работе мы приводим результаты воздействия на вид ВАХ образца колебаний на резонансной частоте, близкой к 7 МГц. Частота $f_0 \approx 7$ МГц соответствует моде колебаний, которая, очевидно, относится к возбуждению 2-й гармоники стоячей звуковой волны [28][6]. Аналогичные результаты, полученные на резонансных частотах 1 и 1.2 МГц, приведены в дополнительных материалах, рис. S2–S7.

На рисунке 1 показаны зависимости дифференциального сопротивления R_d репрезентативного образца TaS_3 от V_{dc}, измеренные методом синхронного детектирования. Показаны кривые без ВЧ воздействий на образец, при возбуждении колебаний на частоте $f_0 \approx 7$ МГц и при приложении V_{rf} на той же частоте. При этом $V_{\mathrm{act}} = 20$ В (номинальное напряжение на выходе генератора) – максимальное напряжение, которое мы подавали на актюаторы, а значение $V_{rf} = 180$ мВ (здесь и всюду указан полный размах напряжения) подобрано так, чтобы приводить к примерно такому же снижению V_t. На кривых $R_d(V_{dc})$, измеренных как при электрическом, так и механическом ВЧ воздействии, можно увидеть 1-ю и 2-ю СШ, причем напряжения механических и электрических СШ близки. Поскольку измерить величины СШ можно лишь очень приблизительно[7], мы остановились на изучении величины 0-й СШ.

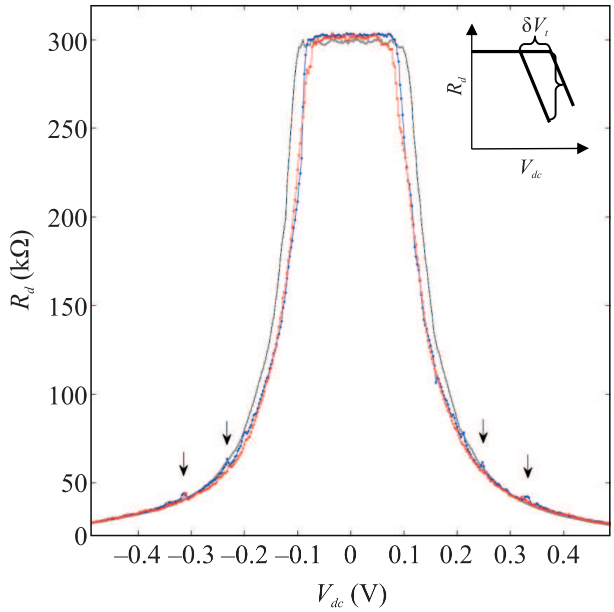

Рис. 1. (Цветной онлайн) Зависимости $R_d(V_{dc})$ без облучения (серая кривая), при подаче на пьезоактюаторы $V_{\mathrm{act}} = 20$ В на частоте $f_{\mathrm{act}} = 6.927$ МГц (красная кривая) и при приложении к образцу ВЧ напряжения $V_{rf} = 180$ мВ на частоте $f = 6.927$ МГц (синяя кривая). Стрелками отмечено положение ступенек Шапиро. $T = 119.5$ К. На вставке: схема, иллюстрирующая методику определения снижения V_t, δV_t, по значению R_d при $V_{dc} \approx V_t$ (без ВЧ воздействия)

Подавление порогового поля удобно изучать, измеряя R_d при фиксированном напряжении, близком к пороговому, $V_{dc} \approx V_t$ [15, 29]. Как видно из рис. 1, форма кривой R_d от V_{dc} в области $V_{dc} > V_t$ с ростом V_{act} меняется незначительно. Поэтому по величине R_d можно определить значение V_t, считая, что снижение R_d с ростом V_{act} связано со сдвигом кривой $R_d(V_{dc})$ по горизонтали, в сторону меньших $|V_{dc}|$ (см.

[6]Это видно по значению частоты: длина подвешенной части образца – 700 мкм, скорость звука – 4900 м/с [28]. Наблюдение резонансов на 1-й, 3-й и 4-й гармониках (3.5, 10.5 и 14 МГц), снижение частоты с ростом натяжения образца и некоторые другие детали [28] также подтверждают наш вывод.

[7]Малые величины СШ связаны также с относительно высокой частотой воздействия на ВЗП, 7 МГц. На частотах 1 и 1.2 МГц степень синхронизации достигала 25 % . Однако при этом с ростом амплитуды $\delta\varepsilon$ существенно изменяется вид ВАХ вблизи V_t, что затрудняет однозначное определение $V_t(\delta\varepsilon)$ (см. дополнительныей материалы, рис. S2, S5). Поэтому мы приводим данные для частоты 7 МГц.

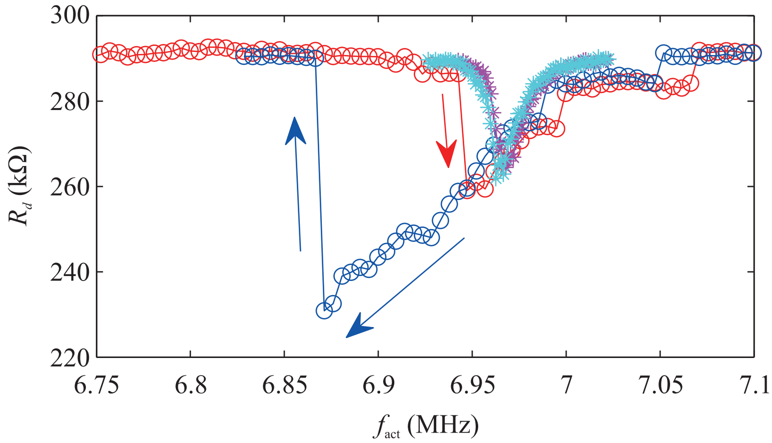

Рис. 2. (Цветной онлайн) Частотные зависимости R_d при $V_{\text{act}} = 20$ В (○) и 8.5 В (∗), измеренные при двух направлениях развертки f_{act}. Синие (голубые) значки соответствуют понижению f_{act}, красные (пурпурные) – повышению f_{act}. $V_{dc} = 105$ мВ

вставку к рис. 1). При этом благодаря резкому спаду R_d в полях выше V_t методика обладает высокой чувствительностью [29].

Если при воздействии V_{rf} пересчет снижения R_d в V_t – чисто техническая задача, при решении аналогичной задачи для случая V_{act} мы столкнулись с некоторым затруднением. Дело в том, что с ростом V_{dc}–V_t, по мере возрастания скорости скольжения ВЗП, снижаются модули упругости кристалла [6]. Если мы зафиксируем V_{dc} и начнем увеличивать V_{act}, с ростом V_{dc}–V_t будет происходить снижение f_0. Это видно из рис. 2, где показан набор частотных зависимостей $R_d(f_{\text{act}})$ при различных значениях V_{act}. Если измерения проводятся при снижении f_{act}, происходит приближение к режиму резонанса сверху по частоте, амплитуда колебаний возрастает, так что снижается и f_0. В момент, когда f_{act} "догоняет" f_0, R_d достигает минимума. При дальнейшем снижении f_{act} колебания выходят из резонанса, V_t возрастает, скорость ВЗП уменьшается, и f_0 возрастает. В результате возникшей положительной обратной связи выход из резонанса происходит скачком, как видно из рис. 2. Аналогичные рассуждения показывают, что резонанса невозможно достичь, если R_d записывать при возрастании f_{act}. В этом случае резкий спад R_d происходит с опозданием, на частоте, уже превышающей $f_0(f_{\text{act}})$ (см. рис. 2). Подобные скачки и гистерезис на зависимостях $R_d(f_{\text{act}})$ наблюдались и в [15]. Исходя из этих наблюдений, мы решили, что для правильного определения $V_t(V_{\text{act}})$ следует брать минимальное значение R_d, измеренное при приближении к резонансу сверху.

Таким образом, для определения зависимостей $V_t(V_{\text{act}})$, мы прописывали зависимости $R_d(f_{\text{act}})$ при разных значениях V_{act} и определяли снижение V_t по минимальному значению R_d. Все измерения проводились при снижении f_{act}.

На рисунке 3 показаны зависимости $V_t(V_{\text{act}})$, полученные на резонансной частоте, близкой к 7 МГц, и $V_t(V_{rf})$, измеренные на той же частоте. Масштаб по оси V_{rf} подобран так, чтобы максимальному значению V_{act} соответствовало напряжение V_{rf}, приводящее примерно к такому же подавлению V_t. Основное, что видно из рис. 3, – качественное отличие зависимостей $V_t(V_{\text{act}})$ и $V_t(V_{rf})$. На кривой $V_t(V_{rf})$ заметна выпуклость вверх, т.е. с ростом V_{rf} спад V_t ускоряется. Такая зависимость характерна для соединений с ВЗП. В случае достаточной когерентности скольжения ВЗП дальнейший рост V_{rf} приводит с снижению V_t до нуля и последующим осцилляциям [2–4]. Немонотонный ход $V_t(V_{rf})$ может наблюдаться и в наиболее совершенных образцах TaS_3 [5]. При этом, в области малых V_{rf} для кривой $V_t(V_{rf})$ характерна выпуклость вверх, как и на рис. 3. Зависимость же $V_t(V_{\text{act}})$ близка к линейной, с тенденцией к насыщению спада с ростом V_{act} (рис. 3). Таким образом, кривые, представленные на рис. 3, находятся в согласии с [19] и подтверждают качественные соображения о принципиальном отличии механизмов синхронизации скольжения ВЗП с электрическими и деформационными ВЧ полями. К аналогичному выводу привело сопоставление кривых $V_t(V_{\text{act}})$ и $V_t(V_{rf})$ на двух других резонансных частотах – 1 и 1.2 МГц (см. дополнительные материалы, рис. S2–S7).

Таким образом, экспериментально установлено качественное различие амплитудных зависимостей порогового поля при подавлении его электрическими и звуковыми колебаниями ВЧ диапазона. Результат

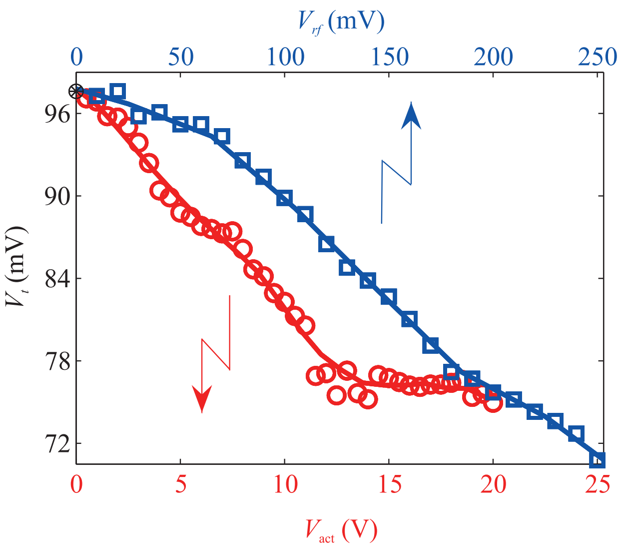

Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимости порогового напряжения от V_{act} (нижняя шкала) и от V_{rf} (верхняя шкала). $f_{act} \approx f_{rf} = 7$ МГц. Точные значения f_{act} при каждом V_{act} соответствуют минимумам $R_d(f_{act})$ на кривых, аналогичных представленным на рис. 2

отражает отличие механизмов воздействия электрического и деформационного полей на движение ВЗП. Если электрическое поле напрямую модулирует скорость и направление движения ВЗП, механическое воздействие сводится к модуляции силы (или глубины потенциала) пиннинга, и, пользуясь терминологией [19], является вертикальным, а не тянущим по отношению к ППП. Хотя проанализированы амплитудные зависимости только 0-й СШ, нет сомнений, что аналогичный критерий позволит отличить и другие механические СШ от электрических, при условии, что их величины будут достаточны для количественных оценок.

Данный результат важен для дальнейших исследований механизмов взаимодействия ВЗП с механическими полями, поскольку предлагает простой критерий, позволяющий отличить воздействие таких полей от электрических наводок. Использование этого критерия дает возможность преодолеть серьезное препятствие для дальнейших исследований воздействия акустических волн на динамику ВЗП с использованием, например, пластин с ПАВ или кварцевых резонаторов.

Прежде чем завершить статью, необходимо отметить еще одну качественную особенность воздействия резонансных мод на вид ВАХ. При внимательном анализе рис. 1 можно заметить, что степень когерентности скольжения ВЗП, в данном контексте - крутизна спада $R_d(V_{dc})$ выше V_t, уменьшается с ростом V_{act}, но слегка возрастает с ростом V_{rf}, в согласии с [30]. На других резонансных модах это отличие еще заметнее (см. Дополнительный материал, рис. S2 и S5). На рисунке S5 можно также заметить раздвоение порога: срыв ВЗП с примесей происходит в два этапа. Возможно, эти отличия связаны с пространственной неоднородностью поля деформации в образце. Необходимо также учесть, что, при данной технологии возбуждения колебаний образца, при записи $R_d(V_{dc})$ невозможно соблюсти условия резонанса при всех V_{dc}, что связано с изменением упругих модулей [6]. Это также существенно влияет на вид кривой $R_d(V_{dc})$. Для однозначной интерпретации эффекта снижения когерентности ВЗП при действии динамической деформации требуются дальнейшие исследования. Однородности деформационного поля можно достичь, положив образец на пластину с ПАВ или кварцевый генератор при условии, что длина волны будет превышать длину образца. Проблема ухода из резонанса при записи ВАХ также отпадет в этом случае.

Авторы благодарны С. В. Зайцеву-Зотову и И. Г. Горловой за ценные замечания, а также Б. А. Логинову за предоставление пьезоэлектрических керамических актюаторов.

Электромеханические исследования TaS_3 и анализ полученных результатов выполнены М. В. Никитиным при поддержке Российского научного фонда, проект # 22-19-00783. Исследования синхронизации с ВЧ электрическими полями проводились В. Я. Покровским, Д. А. Кай и С. Г. Зыбцевым в рамках Госзадания.

1. P. Monceau, Adv. Phys. **61**, 325 (2012).
2. S. Brown and A. Zettl, *Charge Density Wave Current Oscillations and Interference Effects*, in *Charge Density Waves in Solids*, ed. by L. P. Gor'kov and G. Gruner, Elsevier, Amsterdam: North-Holland (1989), v. 25, p. 223.
3. A. Zettl and G. Gruner, Phys. Rev. B **29**, 755 (1984).
4. R. E. Thorne, W. G. Lyons, J. W. Lyding, J. R. Tucker, and J. Bardeen, Phys. Rev. B **35**, 6360 (1987).
5. S. G. Zybtsev, S. A. Nikonov, V. Ya. Pokrovskii, V. V. Pavlovskiy, and D. Starešinić, Phys. Rev. B **101**, 115425 (2020).
6. J. W. Brill, *Elastic properties of low-dimensional materials*, in *Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids, and Gases*, ed. by M. Levy, H. E. Bass, and R. R. Stern, Academic Press, San Diego (2001), v. 2, p. 143.
7. S. Hoen, B. Burk, A. Zettl, and M. Inui, Phys. Rev. B **46**, 1874 (1992).
8. V. Ya. Pokrovskii, S. G. Zybtsev, and I. G. Gorlova, Phys. Rev. Lett. **98**, 206404 (2007).

9. A. V. Golovnya, V. Ya. Pokrovskii, and P. M. Shadrin, Phys. Rev. Lett. **88**, 246401 (2002).
10. С. Г. Зыбцев, М. В. Никитин, В. Я. Покровский, Письма в ЖЭТФ **92**, 448 (2010).
11. В. Я. Покровский, С. Г. Зыбцев, М. В. Никитин, И. Г. Горлова, В. Ф. Насретдинова, С. В. Зайцев-Зотов, УФН **183**, 33 (2013).
12. M. V. Nikitin, S. G. Zybtsev, and V. Ya. Pokrovskii, Phys. Rev. B **86**, 045104 (2012).
13. R. S. Lear, M. J. Skove, E. P. Stillwell, and J. W. Brill, Phys. Rev. B **29**, 5656 (1984).
14. J. Nichols, D. Dominko, L. Ladino, J. Zhou, and J. W. Brill, Phys. Rev. B **79**, 241110R (2009).
15. M. V. Nikitin, S. G. Zybtsev, V. Ya. Pokrovskii, and B. A. Loginov, Appl. Phys. Lett. **118**, 223105 (2021).
16. М. В. Никитин, С. Г. Зыбцев, В. Я. Покровский, *XIX Конференция Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления", 26 мая 2022 г. ФИАН. г. Москва*, Сборник тезисов, М., Иевск, Ижевский институт компьютерных исследований (2022), с.107.
17. М. В. Никитин, В. Я. Покровский, Д. А. Кай, С. Г. Зыбцев, В. В. Колесов, В. В. Кашин, *Тезисы III Международной конференции "Физика конденсированных состояний" ФКС-2023*, под ред. д.ф-м.н. Б. Б. Страумала, Черноголовка, 29 мая–2 июня 2023 г., с. 139.
18. М. В. Никитин, В. Я. Покровский, Д. А. Кай, С. Г. Зыбцев, В. В. Колесов, В. В. Кашин, *XX Конференция "Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления" ФИАН, г. Москва*, 25 мая 2023 г., Сборник тезисов, М., Ижевск, Ижевский институт компьютерных исследований (2023), с. 138.
19. Yu. Funami and K. Aoyama, Phys. Rev. B **108**, L100508 (2023).
20. Y. Wei and Y. Lei, Phys. Rev. E **106**, 044204 (2022).
21. M. Mori and S. Maekawa, Appl. Phys. Lett. **122**, 042202 (2023).
22. H. Fukuyama, J. Phys. Soc. Jpn. **41**, 513 (1976).
23. H. Fukuyama and P. A. Lee, Phys. Rev. B **17**, 535 (1978).
24. P. A. Lee and T. M. Rice, Phys. Rev. B **19**, 3970 (1979).
25. S. E. Brown, G. Gruner, and L. Mihály, Solid State Commun. **57**, 165 (1986).
26. V. Ya. Pokrovskii, M. V. Nikitin and S. G. Zybtsev, Physica B **460**, 39 (2015).
27. М. В. Никитин, В. Я. Покровский, С. Г. Зыбцев, А. М. Жихарев, П. В. Лега, Радиотехника и электроника **63**, 248 (2018).
28. М. В. Никитин, В. Я. Покровский, С. Г. Зыбцев, А. В. Фролов, Письма в ЖЭТФ **109**, 54 (2019).
29. С. Г. Зыбцев, В. Я. Покровский, В. Ф. Насретдинова, С. В. Зайцев-Зотов, Радиотехника и электроника **63**, 992 (2018).
30. S. G. Zybtsev and V. Ya. Pokrovskii, Phys. Rev. B **88**, 125144 (2013).