Письма в ЖЭТФ, том 92, вып. 6, с. 448 – 453 © 2010 г. 25 сентября

Ступеньки Шапиро в кручении квазиодномерного проводника TaS_3

С. Г. Зыбцев, М. В. Никитин, В. Я. Покровский[1)]

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

Поступила в редакцию 24 июля 2010 г.

После переработки 17 августа 2010 г.

В образцах квазиодномерного проводника TaS_3 на зависимостях угла кручения от тока, $\varphi(I)$, наблюдаются особенности при облучении ВЧ полем. Особенности возникают при тех же значениях тока, что и ступеньки Шапиро на вольт-амперных характеристиках, то есть соответствуют синхронизации движения волны зарядовой плотности (ВЗП) ВЧ полем. Вид особенностей на зависимостях $\varphi(I)$ свидетельствует об уменьшении неоднородной деформации ВЗП в условиях синхронизации. Исследование кручения оказывается высокочувствительным методом определения пространственной когерентности ВЗП.

Хорошо известно, что волна зарядовой плотности (ВЗП) в квазиодномерных проводниках может деформироваться при воздействии электрического поля или при изменении температуры. Неоднородная деформация ВЗП возникает в электрических полях, близких к пороговому для начала скольжения ВЗП, и проявляется как в динамике ВЗП, так и в виде остаточной деформации, что означает возникновение метастабильных состояний [1 – 3].

Влияние деформации ВЗП на форму и размеры кристаллов изучено гораздо хуже. Если идти историческим путем, ранее всего механическое воздействие ВЗП на основную решетку было замечено в таких эффектах, как снижение модуля Юнга и модуля сдвига, а также рост внутреннего трения при срыве ВЗП с примесей (депиннинге), о чем можно прочесть в обзоре [4]. Снижение упругих модулей можно рассматривать как результат механического взаимодействия двух кристаллов – ВЗП и основной решетки [5]. С этой точки зрения, снижение упругих модулей находит достаточно простое объяснение: при скольжении ВЗП любая ее деформация, созданная внешними воздействиями (в данном случае при деформации кристалла), быстро релаксирует, и ВЗП не вносит вклад в упругие свойства кристалла. Аналогично можно объяснить и рост внутреннего трения в полях выше порогового [4]: энергия деформации, переданная кристаллом волне зарядовой плотности, не возвращается ему обратно по той же причине – деформация ВЗП быстро релаксирует.

В [6] сообщается о влиянии метастабильных состояний ВЗП, созданных электрическим полем, на длину кристаллов TaS_3: наблюдалось относительное удлинение $\delta L/L \sim 10^{-6}$. В [7] показано, что существенно большего удлинения, порядка $5{\cdot}10^{-5}$, можно достичь, создавая однородную деформацию ВЗП термически. В то же время, как показал расчет [8], в определенных условиях электрическое поле также может создавать огромную деформацию образцов, однако эта деформация неоднородна [8]. В общем виде деформацию образца можно рассматривать как результат механического взаимодействия ВЗП и основной решетки [5], первая из которых деформируется электрическим полем [9]. Этот полуэмпирический подход дает и качественное объяснение кручения в электрическом поле – одного из наиболее необычных эффектов, наблюдавшихся в квазиодномерных проводниках в последние годы [9 – 11]. Несмотря на то, что вид деформации ВЗП, приводящий к кручению, до сих пор до конца не выяснен, достаточно очевидно, что кручение вызвано пространственно-неоднородной деформацией ВЗП.

Приведем вкратце основные результаты исследований кручения. Кручение наблюдалось в пайерлсовском состоянии квазиодномерных соединений TaS_3, $K_{0.3}MoO_3$, $(TaSe_4)_2I$ и NbS_3 [9]. Образцы этих соединений, за исключением $K_{0.3}MoO_3$, представляют собой нитевидные монокристаллы (вискеры), направление роста (длина) которых параллельно проводящим цепочкам. Если образец закреплен так, что один конец может свободно поворачиваться вокруг продольной оси, при приложении к образцу продольного напряжения наблюдается поворот свободного конца относительно неподвижного, то есть возникает деформация кручения. Были сняты зависимости угла кручения от электрического поля, $\varphi(V)$. Оказалось, что направление кручения зависит от знака V и определяется внутренним свойством образца, вероятно, направлением полярной оси [10]. Угол кручения резко возрастает при превышении напряжения порогового

[1)] e-mail: pok@cplire.ru

значения V_t, затем рост насыщается. Зависимость $\varphi(V)$ носит ярко выраженный гистерезисный характер. Величина угла кручения определяется толщиной и длиной образца; для TaS_3 максимальное значение φ соответствует сдвиговой деформации на поверхности образца, превышающей 10^{-4}, причем эта деформация достигается в полях менее 1 В/см. Постоянная времени, характеризующая сдвиг, составляет $10^{-1} \div 10^{-2}$с при температуре $T = 80$ К и падает примерно как $\exp(-\Delta/T)$ с повышением T, где Δ – полуширина пайерлсовской щели [9]. Однако кроме этого, так называемого "медленного" вклада, наблюдается и "быстрый" вклад в кручение, – безгистерезисный и практически линейный по напряжению [9].

Наиболее существенный вклад в кручение связан со статической деформацией ВЗП [10]: петля гистерезиса при $V = 0$ по ширине сравнима с максимальным диапазоном углов кручения (см. ниже рис.2а). Значит, основная часть кручения связана с деформацией ВЗП, которая сохраняется и в нулевом поле. Вместе с тем, рост угла кручения наблюдается и выше порогового поля. Значит, частично кручение связано с деформацией, существующей только при движении ВЗП. Это подтверждают и наши предварительные данные, согласно которым динамическая деформация ВЗП, которая, как известно, проявляется в широкополосном низкочастотном шуме, может приводить к стохастическим колебаниям угла кручения. "Быстрый" вклад в кручение, проявляющийся как крутильный отклик на переменное электрическое поле [9], также свидетельствует о динамическом вкладе ВЗП в кручение. В то же время, детально вопрос о проявлении динамики ВЗП в кручении до сих пор не исследовался.

Один из наиболее интересных эффектов, в которых проявляется динамика скольжения ВЗП – синхронизация движения ВЗП при воздействии ВЧ или СВЧ полей [1–3]. Если при каком-то значении V частота ВЧ колебаний совпадает с частотой собственного узкополосного шума ВЗП (с так называемый фундаментальной частотой скольжения ВЗП) или с одной из ее гармоник или субгармоник, на зависимости $I(V)$ наблюдается интервал постоянного тока ВЗП – так называемая ступенька Шапиро. Соответственно, на зависимости $R_d \equiv dV/dI$ от V появляется пик. Суть эффекта состоит в том, что внешнее ВЧ поле заставляет скользить ВЗП с заданной скоростью в некотором диапазоне напряжений, и ее дифференциальное сопротивление возрастает, при полной синхронизации – до бесконечности. Ступеньки Шапиро свидетельствуют о росте *временно́й* когерентности движения ВЗП: в разных точках образца ВЗП преодолевает периодический потенциал пиннинга синфазно. Можно предположить, что кручение позволит судить о *пространственной* когерентности ВЗП.

Каким может быть проявление ступенек Шапиро в кручении? С одной стороны, в условиях синхронизации прекращается рост скорости скольжения ВЗП, то есть движение ВЗП как бы замораживается. Можно ожидать, что при этом замораживается и рост неоднородной деформации ВЗП, например, – сдвиговой, с которой, по-видимому, связано кручение [9, 10]. Значит, в условиях полной синхронизации ($dI_{\rm CDW}/dV = 0$), можно ожидать *прекращения* роста кручения: $d\varphi/dV = 0$. С другой стороны, ВЧ поле может не только останавливать или замедлять рост тока ВЗП, но и влиять на ее пространственную структуру. Если рост когерентности скольжения ВЗП сопровождается ростом ее пространственной когерентности, можно ожидать *уменьшения* угла кручения в области ступеньки Шапиро даже при неполной синхронизации движения.

О влиянии синхронизации ВЗП на механические свойства квазиодномерных проводников сообщалось ранее в работе [12]. Одновременно со ступеньками Шапиро, авторы [12] наблюдали на образцах TaS_3 и $NbSe_3$ максимумы модуля Юнга и минимумы внутреннего трения. Оба результата свидетельствуют о том, что в условиях, когда $dI_{\rm CDW}/dV = 0$, состояние ВЗП подобно запиннингованному. С точки зрения модели двух взаимодействующих кристаллов, рост модуля Юнга означает, что ВЗП при синхронизации становится жестче связана с решеткой кристалла: деформация ВЗП, вызванная деформацией образца, не релаксирует, несмотря на движение ВЗП. Об этом же свидетельствует и снижение внутренних потерь (рост добротности изгибных колебаний) [12].

В данной работе мы также исследуем механическое проявление синхронизации ВЗП. Однако в отличие от авторов [12] мы не прикладываем внешних сил к образцам, а исследуем их собственную деформацию кручения, возникающую при скольжении ВЗП.

В качестве объекта исследования мы выбрали TaS_3, соединение, в котором кручение наиболее детально изучено. Выбор именно этого соединения является в какой-то степени компромиссом. ВЗП в нем обладает сравнительно низкой когерентностью, и полной синхронизации при облучении не наблюдается. Полная синхронизация наблюдалась в $K_{0.3}MoO_3$, [13] и 50%-ная – в NbS_3 [14], однако углы кручения кристаллов этих соединений меньше, чем в TaS_3. Кручение, примерно такое же по величине, как в TaS_3, наблюдалось в $(TaSe_4)_2I$, однако скольжение ВЗП в этом соединении отличается низкой когерентностью: добротность узкополосного шума при скольжении ВЗП в этом соединении не превышает 10 [15], а ступеньки Шапиро не наблюдались вообще.

Для исследования кручения образцы TaS_3 были приготовлены следующим образом: на нитевидные монокристаллы (вискеры) длиной 3 и 5 мм, площадью сечения, соответственно, 100 и 20 мкм^2, были нанесены золотые контакты. Вискеры были подвешены в оптическом криостате вертикально, контакты были прижаты индием (рис.1). Примерно посредине

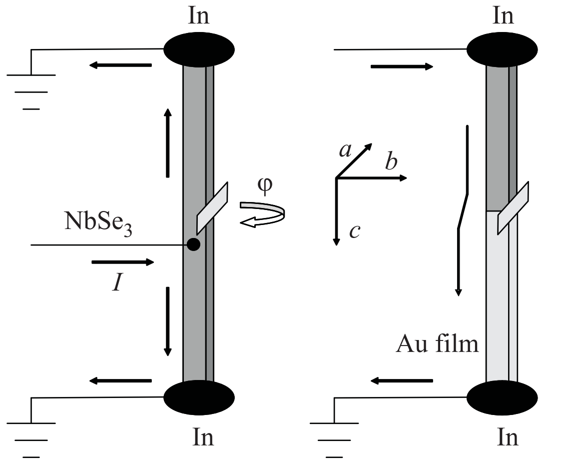

Рис.1. Схема монтажа образцов TaS_3 для исследования кручения. Ток протекает вдоль кристаллографической оси c. Оба конца каждого из образцов зафиксированы с помощью индиевых контактов, вблизи середины приклеено микрозеркало (вискер $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$, запыленный золотом). К образцу № 1 (слева) вблизи середины припаяна микропроволока (тонкий вискер $NbSe_3$). Половина образца № 2 (справа) запылена шунтирующим слоем золота. Направления протекания тока показано стрелками

каждого из образцов было приклеено микрозеркало – вискер $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ [10]. В первых экспериментах использовалась конфигурация образца с одним фиксированным концом [10]. Использованные в данном эксперименте конфигурации по сути совпадают с изначальной, однако для упрощения монтажа оба конца вискера были зафиксированы на подложке. К образцу № 1 (рис.1, слева) вблизи середины была припаяна микропроволока (тонкий вискер $NbSe_3$), игравшая роль одного из контактов. Половина длины образца № 2 была покрыта шунтирующим слоем золота (рис.1, справа). Таким образом, и в этом случае можно считать, что контакт находится посредине образца. В первом случае оба конца образца были заземлены, и ток, втекавший через микропроволоку, протекал через обе половины образца в разные стороны. При этом каждая из половин работала как крутильный актюатор, вращая середину образца в одну и ту же сторону [10, 16]. Во втором случае ток протекал только через одну половину образца, другая играла роль пассивной растяжки. Кручение регистрировалось по перемещению отраженного от микрозеркала луча. При исследовании первого образца приемником являлся фотодиод, сопряженный с коллиматором с ножевой диафрагмой [16], при исследовании второго – двухсекционный фотодиод. В обоих случаях электрический сигнал с фотодиода был линейно связан с отклонением отраженного луча. Таким образом записывались петли $\varphi(I)$. Одновременно мы могли снимать зависимости $R_d(I)$ в режиме заданного тока с использованием метода синхронного детектирования. Для этого на образец, помимо I, подавался переменный ток малой амплитуды, δI, являвшийся одновременно опорным сигналом для детектора.

Для наблюдения синхронизации ВЗП на образец подавалось напряжение с ВЧ генератора. Поскольку шумы на зависимостях $\varphi(V)$ были довольно существенными, для четкого наблюдения ступенек Шапиро в кручении мы также использовали методику синхронного детектирования. Для этого на вход усилителя с синхродетектором вместо переменного напряжения с образца подавался сигнал с фотодиода. Сигнал на выходе усилителя был пропорционален амплитуде колебаний образца под действием малого тока δI, то есть производной $d\varphi/dI$. Наиболее четкие ступеньки Шапиро на кривых $R_d(V)$ наблюдались при температурах 110–125 К, при которых и представлены экспериментальные результаты.

На рис.2а представлены измеренные в идентичных условиях кривые $\varphi(I)$ и $R_d(I)$ для образца № 1 без ВЧ облучения. Обе зависимости имеют пороговый вид. На зависимости $\varphi(I)$ очевиден гистерезис. Выше порогового тока она быстро выходит на насыщение, и значение угла кручения практически сохраняется при снятии напряжения с образца. Выраженный пороговый вид зависимостей $\varphi(I)$ и $R_d(I)$ свидетельствует об одновременном депиннинге ВЗП во всем объеме образца и позволяет говорить о высокой степени однородности образца № 1 и когерентности ВЗП в нем. Результат воздействия ВЧ излучения виден из рис.2b. При данной амплитуде ВЧ пороговое напряжение значительно уменьшается, но остается конечным. Соответственно, сужается вдоль оси токов и петля гистерезиса $\varphi(I)$.

На зависимости $R_d(I)$, представленной на рис.2b, хорошо видны пики R_d при I примерно ± 40 мкА, соответствующие ступенькам Шапиро. Это подтверждается тем, что аналогичные пики видны при частотах облучения 250 и 1000 кГц, причем нелинейный

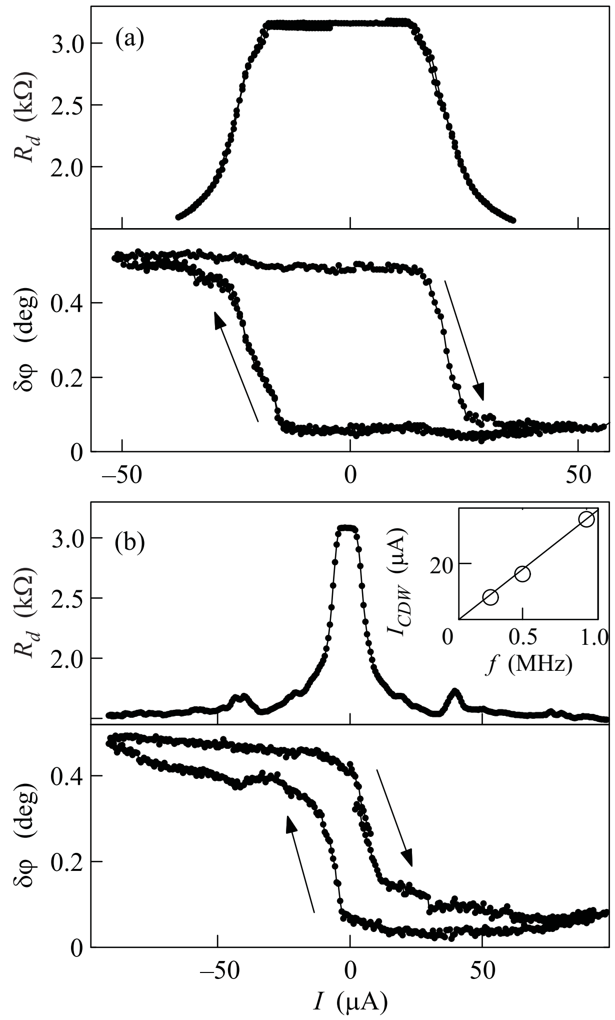

Рис.2. Зависимости $\varphi(V)$ и $R_d(V)$ для образца №1 при $T = 121$ К. (a) – без облучения, (b) – при ВЧ облучении на частоте 500 кГц. На вставке (b) показана зависимость тока ВЗП при максимальной синхронизации от частоты ВЧ излучения

ток, соответствующий пику, прямо пропорционален частоте облучения (см. вставку к рис.2b). Отношение плотности тока ВЗП к частоте, 40 А/МГц·см^2, соответствует данным, известным для TaS_3 [17]. При полной синхронизации ВЗП пики достигали бы уровня $R_d(0)$. В нашем случае степень синхронизации гораздо ниже, около 10%. Такая степень синхронизации характерна и даже весьма велика для TaS_3, что также свидетельствует о когерентности ВЗП в образце №1.

На зависимости $\varphi(I)$ можно разглядеть едва заметные особенности, соответствующие ступенькам Шапиро. Чтобы изучить эти особенности, мы исследовали кручение на переменном токе (на частоте, много ниже всех крутильных резонансов) с помощью синхронного детектора. Измеренный при этом сигнал, пропорциональный $d\varphi/dI$, представлен на рис.3a. Пики, соответствующие ступенькам Шапиро, хорошо видны при обеих полярностях. Отметим, что пики пересекают уровень, соответствующий $d\varphi/dI = 0$, то есть в условиях синхронизации образец начинает крутиться в обратную сторону. Этот результат позволяет сделать вывод, что деформация ВЗП, с которой связано кручение, не только перестает расти, но и заметно уменьшается, даже при такой низкой степени синхронизации ВЗП.

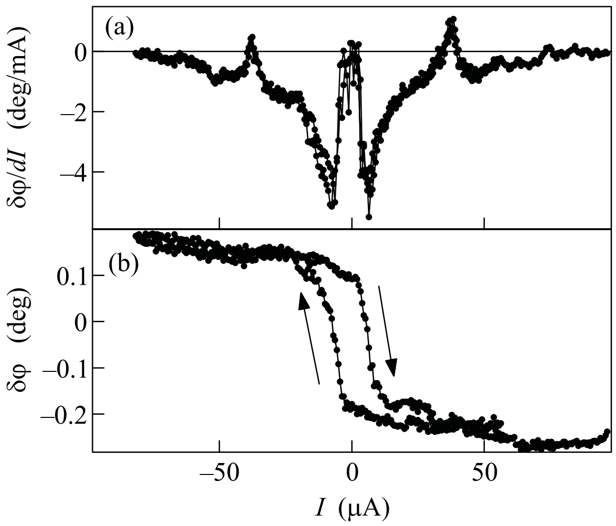

Рис.3. (a) Дифференциальный сигнал с фотодиода (действующее значение), измеренный с помощью синхронного детектора. Частота модуляции 333 Гц (в 20 раз ниже частоты первого крутильного резонанса), амплитуда $\delta I = 0.6$ мкА, $T = 121$ К. (b) Зависимость $\varphi(I)$, полученная при тех же условиях

На рис.3b показана зависимость $\varphi(I)$, полученная в тех же условиях. Видно, что производная (рис.3a) не отражает гистерезисной части зависимости. Этого следовало ожидать, так как при малых вариациях тока, δI, изменение φ в области порогового тока не повторяет резкого роста $\varphi(I)$: на этом участке зависимость необратима. В то же время, выше порогового тока метод синхронного детектирования корректно отражает особенности на производной $d\varphi/dI$.

Сопоставляя рис.3a с рис.2b, можно заметить, что методика исследования кручения (с применением синхронного детектирования) более чувствительна к синхронизации, чем методика исследования резистивного отклика. Этот вывод иллюстрирует и рис.4, на котором приведены результаты исследования ступенек Шапиро для образца №2. Особенность этого образца – более высокая степень хаотич-

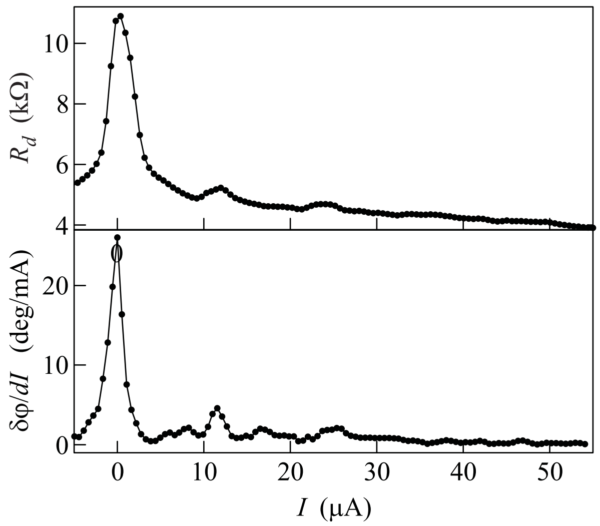

Рис.4. Токовые зависимости дифференциального сопротивления (вверху) и дифференциального сигнала с фотодиода, измеренного с помощью синхронного детектора (внизу) при ВЧ облучении на частоте 1 МГц. Для обеих кривых частота модуляции 333 Гц, амплитуда $\delta I = 0.5$ мкА, $T = 113$ К. При отсутствии ВЧ облучения $R_d(0) = 18$ кОм, $V_t = 90$ мВ ($E_t = 360$ мВ/см)

ности движения ВЗП. В результате пики, соответствующие ступенькам Шапиро, менее выражены. В то же время, видны пики, соответствующие гармоникам и субгармоникам фундаментальной частоты. Для наилучшего наблюдения эффектов синхронизации мы подавали сравнительно высокое ВЧ напряжение, при котором зависимость $R_d(I)$ теряет пороговый вид. Как видно из рис.4, зависимости $d\varphi/dI$ от I имеют сложную структуру, и по ним трудно судить об изменении угла кручения и степени когерентности ВЗП в условиях синхронизации. Тем не менее, сравнивая ступеньки Шапиро на зависимостях R_d и $d\varphi/dI$ от I, можно заметить, что тонкая структура гармоник и субгармоник лучше видна из кривой $d\varphi/dI$ от I.

Итак, данное исследование показало, что в условиях синхронизации внешним ВЧ облучением ВЗП не просто двигается с постоянной скоростью, но и повышает свою пространственную когерентность, снижая степень неоднородной деформации. Экстраполируя результат, представленный на рис.3, можно предположить, что в случае полной синхронизации угол кручения снизился бы до нуля (если не считать гистерезисного вклада). Значит, при полной синхронизации должна полностью исчезать неоднородная деформация ВЗП, по крайней мере, та часть ее, с которой связано кручение (скорее всего, – сдвиговая [9, 10]). Этот вывод согласуется и с результатом [12]: снижение деформации означает, что ВЧ поле "привязывает" ВЗП к основной решетке. Значит, и деформироваться ВЗП должна вместе с решеткой, а релаксации возникающей при этом упругой энергии ВЗП препятствует "привязка" фазы к решетке [18]. Этим логично объяснить повышение модуля Юнга ВЗП в условиях ступеньки Шапиро [12].

Таким образом, можно сделать вывод, что исследование кручения или, говоря шире, неоднородной деформации образцов квазиодномерных проводников, вызванной электрическим полем, позволяет изучать тонкие эффекты в динамике пространственно-неоднородной деформации ВЗП. К сказанному следует добавить, что результаты исследования носят предварительный характер: требуется более детально изучить эффект как на разных образцах TaS_3, так и для различных квазиодномерных соединений.

Авторы благодарны Р.Е. Торну (R.E. Thorne) за предоставление высококачественных образцов TaS_3 и С.В. Зайцеву-Зотову за плодотворное обсуждение. Работа проводилась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 08-02-01303-а), фонда "Научный потенциал", а также в рамках Программы Президиума РАН № 27 "Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов", Программы РАН "Новые материалы и структуры" и Международной Европейской лаборатории "Физические свойства когерентных электронных состояний в твердых телах" при поддержке НЦНИ (Франция), РАН и Российского фонда фундаментальных исследований, включающей МСВТ и ИРЭ РАН.

1. P. Monceau, in: *Electronic Properties of Inorganic Quasi-one-dimensional Conductors*, Part 2. Ed. P. Monceau. Dortrecht: D.Reidel Publ. Comp., 1985, p. 139.
2. G. Grüner, in *Density Waves in Solids*, Addison-Wesley Reading, Massachusetts, 1994.
3. S. A. Brazovskii, N. N. Kirova, and P. Monceau (Editors), *Proc. of the Intern. Workshop on Electronic Crystals on Strongly Correlated Electron Systems (ECRYS 2008)*; Physica B: Condensed Matter **404**, 347 (2009).
4. J. W. Brill, in *Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids, and Gases*, Eds. M. Levy, H. E. Bass, and R. R. Stern, Academic Press, New York, 2001, Vol. II, pp. 143–162.
5. G. Mozurkewich, Phys. Rev. B **42**, 11183 (1990).
6. S. Hoen, B. Burk, A. Zettl, and M. Inui, Phys. Rev. B **46**, 1874 (1991).
7. A. V. Golovnya, V. Ya. Pokrovskii, and P. M. Shadrin, Phys. Rev. Lett **88**, 246401 (2002).

8. В.Я. Покровский, Письма в ЖЭТФ **86**, 290 (2007) [JETP Lett. **86**, 260 (2007)].
9. V. Ya. Pokrovskii, S. G. Zybtsev, V. B. Loginov et al., Physica B **404**, 437 (2009).
10. V. Ya. Pokrovskii, S. G. Zybtsev, and I. G. Gorlova, Phys. Rev. Lett. **98**, 206404 (2007).
11. J. Nichols, D. Dominko, L. Ladino et al., Phys. Rev. B **79**, 241110(R) (2009).
12. L. C. Bourne, M. S. Sherwin, and A. Zettl, Phys. Rev. Lett. **56**, 1952 (1986).
13. S. G. Zybtsev, V. Ya. Pokrovskii, and S. V. Zaitsev-Zotov, Nature Commun., to be published.
14. S. G. Zybtsev, V. Ya. Pokrovskii, V. F. Nasretdinova, and S. V. Zaitsev-Zotov, Appl. Phys. Lett. **94**, 152112 (2009).
15. Z. Z. Wang, M. C. Saint Lager, P. Monceau et al., Solid State Commun. **46**, 325 (1983); G. Mozurkewich, K. Maki, and G. Grüner, Solid State Commun. **48**, 453 (1983).
16. V. Ya. Pokrovskii and S. G. Zybtsev, arXiv:0708.2694v1 [cond-mat.str-el].
17. P. Monceau, M. Renard, J. Richard et al., Phys. Rev. B **28**, 1646 (1983).
18. Хотя в случае примесного пиннига периодический потенциал не связан напрямую с фазой решетки, любое изменение периода ВЗП относительно решетки (а значит, и относительно примесей) означает изменение ее фазы относительно внешнего ВЧ поля. Этому-то поле и препятствует.