Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 9, с. 622 – 630 © 2026 г. 10 мая

Динамика волны зарядовой плотности в поле акустической волны

Д. Ю. Салтыкова[+*], *М. В. Никитин*[+], *В. Я. Покровский*[+1)], *С. Г. Зыбцев*[+], *В. В. Колесов*[+], *В. В. Кашин*[+], *И. Е. Кузнецова*[+], *И. А. Недоспасов*[+]

[+]*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия*

[*]*Московский физико-технический институт (Национальный университет), 141700 Долгопрудный, Россия*

Поступила в редакцию 16 марта 2026 г.
После переработки 25 марта 2026 г.
Принята к публикации 25 марта 2026 г.

Вискеры квазиодномерного проводника TaS_3 с волной зарядовой плотности были зафиксированы на поверхности пластины ниобата лития. При возбуждении в пластине акустических волн различного типа с длиной волны $\lambda = 3$ мкм на вольт-амперных характеристиках вискеров наблюдаются ступеньки Шапиро (СШ$_\text{W}$), свидетельствующие о синхронизации скольжения ВЗП с акустическими волнами. Для образца длиной $L = 740$ мкм, $L \approx \frac{1}{4}\lambda$, СШ$_\text{W}$ существенно отличаются по структуре и амплитудной зависимости от ступенек Шапиро (СШ$_\text{V}$), наблюдаемых при подаче напряжения на той же частоте непосредственно на образец, и отражают более неоднородный характер скольжения ВЗП в режиме синхронизации. При исследовании сегментов того же образца длиной $L \ll \lambda$ отличия между СШ$_\text{W}$ и СШ$_\text{V}$ практически исчезают. Сделан вывод, что особенности СШ$_\text{W}$ в длинных образцах связаны с пространственной неоднородностью высокочастотного поля – электрического и/или упругого. Полученные результаты открывают широкие возможности комбинирования устройств акустоэлектроники и квазиодномерных проводников с ВЗП.

DOI: 10.7868/S3034576626050053

Синхронизация скольжения волны зарядовой плотности (ВЗП) с внешним электрическим полем высокочастотного (ВЧ) диапазона – одно из характерных явлений, наблюдаемых в квазиодномерных проводниках ниже температуры пайерлсовского перехода T_P – проявляется в возникновении так называемых ступенек Шапиро (СШ) на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) [1, 2]. В области СШ ток ВЗП не зависит или слабо зависит от напряжения. Соответственно, на зависимостях дифференциального сопротивления R_d от напряжения V (или тока I) в области СШ наблюдаются пики R_d.[2)]

СШ связаны с движением ВЗП в периодическом потенциале пиннинга (ППП) и наблюдаются при токах, при которых частота преодоления ВЗП барьеров ППП совпадает с частотой внешнего поля или какой-либо из его гармоник или субгармоник. Эффект синхронизации и зависимость величин СШ от амплитуды ВЧ поля можно описать в модели колебаний ВЗП в ППП [3]. При этом надо иметь в виду, что колебания асимметричны по перемещению в том смысле, что перемещение ВЗП за период ВЧ поля вперед на n периодов превышает ее перемещение назад, где n – номер СШ.

В квазиодномерных проводниках с ВЗП наблюдается ряд уникальных электромеханических свойств [4–19], которые можно рассматривать как следствие упругого взаимодействия ВЗП – трехмерного электронного кристалла внутри образца – с самим кристаллом. В простой одномерной модели коэффициент, вообще говоря – тензор, связывающий деформации электронного кристалла и собственно образца, равен нулю. Это значит, что деформация образца не выводит ВЗП из равновесия, а деформация ВЗП не приводит к деформации образца. Взаимодействие ВЗП-решетка возникает в случае нетривиальной зависимости волнового вектора $\mathbf{q}$ ВЗП от деформации образца [5], т.е., когда при деформации кристалла изменяется равновесная конфигурация ВЗП относительно кристалла. Этому критерию удовлетворяет [20] соединение TaS_3 (ромбической фазы) [1] – характерного квазиодномерного проводника с ВЗП с $T_P = 220$ К, в котором эффекты, связанные с взаимодействием ВЗП-решетка, особенно выражены[3)] [4, 6–20]. В TaS_3 наблюдается также выраженный тензорезистивный эффект, в том числе при кру-

1)e-mail: vadim.pokrovskiy@mail.ru

2)Ниже для краткости мы их также будем называть СШ.

3)Снижение модуля Юнга при депиннинге ВЗП в TaS_3 достигает 4 % [9], модуля сдвига – 20 % [7], углы кручения достигают нескольких градусов при сдвиговой деформации $\sim 10^{-4}$ [13, 14]. Продольная же деформация вискеров TaS_3 при однородной деформации ВЗП достигает $6 \cdot 10^{-5}$ [12].

тильной деформации. При этом тензорезистивный отклик резко возрастает при напряжениях выше V_t [15, 17]: коэффициент тензочувствительности может достигать 10 для крутильной деформации и на порядок выше – для продольной [17]. Это означает, что при деформации изменяется проводимость ВЗП, что логично объяснить изменением ее конфигурации относительно ППП, а значит – и относительно решетки кристалла. Таким образом, модуляцию проводимости TaS_3 также логично связать с нетривиальной зависимостью q-вектора от деформации образца.

Недавно удалось наблюдать СШ на ВАХ вискеров TaS_3, подвешенных между двумя пьезоэлектрическими керамическими актюаторами при возбуждении в них механических колебаний ВЧ диапазона [19]. Этот эффект, который можно рассматривать как тензорезистивный отклик ВЗП на ВЧ деформацию, открывает возможность использования образцов с ВЗП в качестве детекторов ВЧ механических колебаний и волн с частотным разрешением. Однако дальнейшее исследование эффекта продвигается медленно. Это связано, на наш взгляд, с ограниченностью возможностей методики, использованной в [19]: СШ наблюдались только в резонансных модах колебаний. Даже если к пьезоактюаторам прикладывалось максимальное напряжение генератора, с размахом около 20 В, амплитуда СШ оставалась относительно небольшой. Величину V_t удавалось уменьшить менее чем в два раза, в то время как, прикладывая напряжение V^s_{pkpk} [4)] той же частоты непосредственно к образцу, удается наблюдать подавление V_t до нуля и последующие осцилляции V_t [3] с ростом V^s_{pkpk}. Ограничена методика [19] и по частотам. Собственная резонансная частота актюаторов при сдвиговых колебаниях составляет 2–3 МГц, выше которой амплитуда колебаний быстро спадает. Наконец, отметим сложность техники подвешивания микроскопических ниточек между актюаторами.

В нескольких теоретических работах было предложено синхронизировать скольжение ВЗП в образцах, закрепленных на подложке, с ультразвуковыми волнами (вибрациями) в этой подложке [21–24]. "Дамокловым мечом" при экспериментальной реализации этих идей является опасность перепутать СШ механического происхождения со ступеньками, вызванными электрической наводкой на той же частоте, либо электрическим полем самой волны. В связи с этим отметим расчет [21], показавший, что амплитудные зависимости ширин СШ, возбуждаемых электрическими и механическими колебаниями, качественно отличаются: если с ростом *электрического* поля ширина СШ зависит немонотонно, испытывая осцилляции, то с ростом амплитуды *механической* деформации происходит монотонный рост ширины СШ с последующим насыщением. Данное отличие наблюдалось [25] на 0-й СШ – участке ВАХ при $|V| < V_t$ [3] – и имеет качественное объяснение: при достаточно большой амплитуде ВЧ электрического поля ВЗП может двигаться вперед–назад на несколько периодов, что и объясняет осцилляции ширин СШ [3]. Механическая же деформация рассматривается как модуляция силы пиннинга [21] и не может сдвинуть ВЗП ни вперед, ни назад. Вместе с тем, в [24] те же авторы рассмотрели случай, при котором деформация приводит к продольному смещению центров пиннинга. В этом случае возможны и осцилляции ширин СШ.

В работах [26–29] сообщается об экспериментальном наблюдении СШ на ВАХ TaS_3 и NbS_3, расположенных на кварцевых резонаторах, а также на пьезоэлектрических подложках. Синхронизация ВЗП наблюдалась только при возбуждении в них резонансных мод, в частности, при возбуждении поверхностных акустических волн (ПАВ) в ниобате лития ($LiNbO_3$). В ссылке 15 из [21] сообщается об экспериментальном наблюдении СШ на ВАХ вискеров $NbSe_3$, расположенных на пьезоэлектрической подложке из $LiNbO_3$, в которой возбуждались ПАВ с длиной волны ~ 1 мкм. Однако каких-то качественных различий вида ВАХ при воздействии на образец механических колебаний и ВЧ напряжения, приложенного непосредственно к образцу, в этих работах не наблюдалось. Соответственно, не удалось различить вклады электрического и деформационного полей в синхронизацию скольжения ВЗП при воздействии волн в пьезоэлектрических подложках.

Особо отметим недавнюю работу [30], в которой исследовано воздействие ПАВ на вискеры $NbSe_3$. Наблюдалось качественное отличие вида СШ, индуцируемых акустической волной ($СШ_W$), от обычных СШ, возникающих при приложении СВЧ напряжения непосредственно к образцу ($СШ_V$). Как и в [25], наблюдалось также отличие амплитудных зависимостей ширин $СШ_W$ и $СШ_V$.

В настоящей работе сообщается о наблюдении СШ ($СШ_W$) на ВАХ вискеров TaS_3, закрепленных на поверхности ниобата лития при возбуждении в нем мод различных акустических волн. СШ ($СШ_V$) наблюдаются и при подаче высокочастотного напряжения непосредственно на образец. Если длина образца L сравнима с длиной волны λ (в нашем случае

[4)] Нижний индекс "pkpk" подразумевает, что ниже все численные значения будут соответствовать размаху (удвоенной амплитуде) напряжения.

$L \approx \frac{1}{4}\lambda$), структура СШ$_\mathrm{W}$ и амплитудные зависимости их ширин существенно отличаются от структуры СШ$_\mathrm{V}$, свидетельствуя о разбиении ВЗП на домены. При исследовании более коротких сегментов того же образца, $L \ll \lambda$, структуры СШ$_\mathrm{W}$ и СШ$_\mathrm{V}$ оказались практически одинаковыми. Сделан вывод, что вид СШ$_\mathrm{W}$ отражает пространственную неоднородность высокочастотного поля, действующего на ВЗП. При этом на ВЗП может воздействовать как электрическая, так и упругая компонента волны. Чтобы различить вклады этих компонент, требуются дальнейшие исследования.

Образцы TaS_3 были зафиксированы на поверхности пластины ниобата лития толщиной 500 мкм с нанесенными на нее встречно-штыревыми преобразователями (ВШП). Напомним, что ВШП (Interdigital transducer – IDT) были предложены для возбуждения ПАВ в кристаллах кварца на частотах свыше 10 МГц [31]. В нашей работе использовались волны других типов, распространяющиеся в пластине в частотном диапазоне 1–20 МГц. Мы выбрали этот диапазон исходя из предположения, что более низкие частоты предпочтительны для наблюдения СШ в TaS_3. При этом волны могут быть антисимметричными (An) или симметричными (Sn) волнами Лэмба, либо волнами с поперечно-горизонтальной поляризацией (SHn). Здесь n означает порядок волны. Длина волны λ при этом задавалась параметрами ВШП и составляла 3 мм. В связи с тем, что рассматриваемые волны имеют разные скорости распространения при одной и той же длине волны, в рассматриваемом частотном диапазоне можно наблюдать множество резонансных мод.

Представленные ниже исследования проведены на одном образце TaS_3 ромбического политипа шириной около 1 мкм и толщиной около 0.1 мкм (рис. 1). Нанесенные на вискер методом лазерного распыления золотые контакты позволили подавать напряжение, в том числе высокочастотное, непосредственно на образец. Изначально расстояние между контактами составляло 740 мкм. Затем на образец были нанесены два дополнительных контакта длиной около 100 мкм, так что образец оказался разделенным на три сегмента длиной примерно 200, 160 и 150 мкм. Для получения зависимостей $R_d(V)$ мы использовали методику синхронного детектирования на низкой частоте.

Вискер был расположен между двумя ВШП, ближе к одному из них (рис. 1). При подаче ВЧ напряжения V^{idt}_{pkpk} на ВШП исследовалась синхронизация ВЗП с акустическими волнами в ниобате лития. Возможность подачи ВЧ напряжения (V^{s}_{pkpk}) на образец позволила исследовать обычные СШ (СШ$_\mathrm{W}$) на ВАХ.

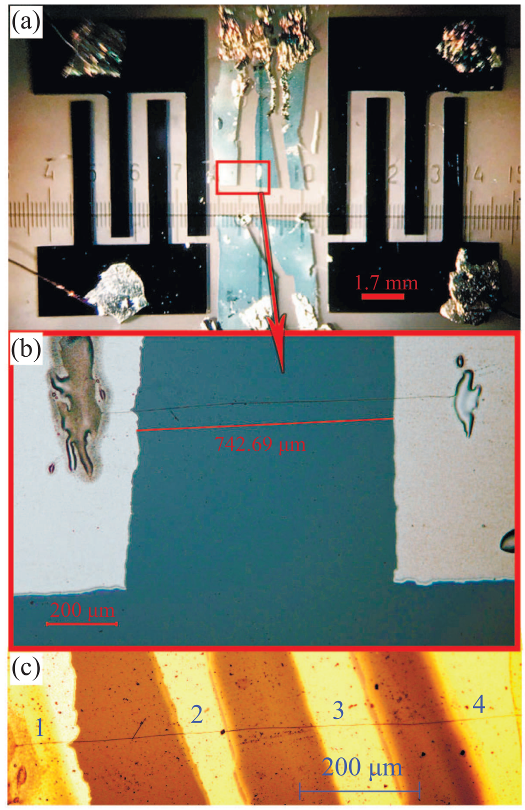

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) – Микрофотография пластины $LiNbO_3$ с двумя ВШП. Между ними видны контактные полоски, подводящие напряжение к образцу. (b) – Фрагмент верхней фотографии с большим увеличением микроскопа. Виден образец TaS_3 и два контакта к нему. (c) – Микрофотография того же образца после напыления двух дополнительных контактных полосок. Контакты пронумерованы. Соответствующие длины сегментов $L_{12} \approx 200$ мкм, $L_{23} \approx 160$ мкм и $L_{34} \approx 150$ мкм (см. рис. 6b, 7)

Отобранный образец отличается высокой степенью когерентности скольжения ВЗП. При воздействии ВЧ полей на нем наблюдалась высокая степень синхронизации скольжения ВЗП: падение дифференциальной проводимости ВЗП достигало 75 %, что является очень высоким показателем для TaS_3. Все измерения проводились при температуре около 120 К, оптимальной для наблюдения электромеханических эффектов в TaS_3.

Для поиска синхронизации ВЗП с акустической волной, как и в [19, 25], использовался эффект уменьшения порогового напряжения, т.е. подавления 0-й СШ. Записывались частотные зависимости $R_d(f)$

при подаче на образец постоянного напряжения V_0 чуть ниже порогового V_t. При воздействии акустической волны V_t снижается и оказывается ниже V_0, так что на зависимости $R_d(f)$ возникает провал.

Каждый из многочисленных узких минимумов R_d, которые можно видеть на рис. 2a, соответствует возбуждению одной из волновых мод. Это ясно из рис. 2b, на котором приведена частотная зависимость мощности, поглощаемой в пластине ниобата лития. На этой кривой виден ряд пиков, каждый из которых соответствует пьезоактивной акустической моде с длиной волны 3 мм. Эти волны характеризуются различными направлениями смещения частиц пластины при их распространении. Видно, что пики на рис. 2b (ось "y" направлена вниз) совпадают с провалами на рис. 2a. Частоты мод, при возбуждении которых были исследованы зависимости $R_d(I)$, обозначены стрелками. Воздействие напряжения на частотах выше 20 МГц не исследовалось.

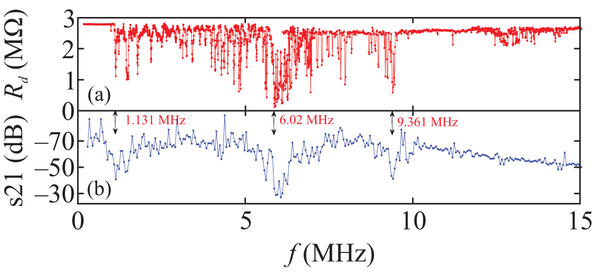

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Частотная зависимость дифференциального сопротивления образца TaS_3 ($L = 740$ мкм) при смещении $V_0 \approx V_t = 70$ мВ в режиме возбуждения акустических волн в пластине. $V_{pkpk}^{idt} = 5.65$ В. (b) – Спектр акустических волн (параметр s21 передачи мощности от ВШП-1 на ВШП-2), возбуждаемых в диапазоне частот 0.1–15 МГц. Ось ординат направлена вниз

Как мы и ожидали, при возбуждении волн на частотах, соответствующих минимумам R_d, на зависимостях $R_d(I)$ наблюдались СШ$_W$, а также подавление 0-й СШ$_W$ (рис. 3). При отклонении частоты напряжения, подаваемого на ВШП, от значения, соответствующего одной из мод, СШ пропадали. Подача ВЧ напряжения на той же частоте непосредственно на образец приводит к появлению СШ$_W$ на ВАХ при примерно тех же значениях тока ВЗП. Приведенные на рис. 3 зависимости $R_d(I)$ записаны при воздействии на образец ВЧ напряжения на частоте 1.131 МГц и волны на той же частоте, соответствующей моде SH_0. Аналогичные результаты были получены ранее [26–30]. Все эти результаты свидетельствуют о возможности синхронизации скольжения ВЗП с пьезоактивной акустической волной. При

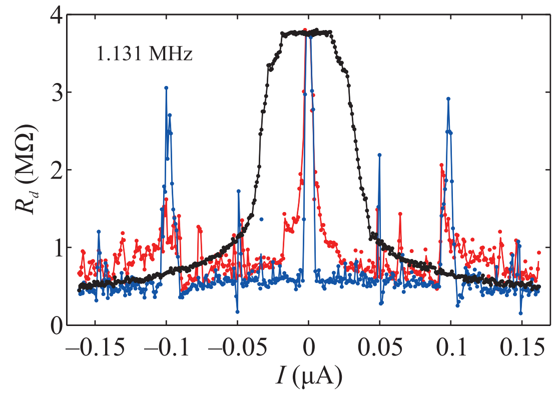

Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимости $R_d(I)$ без облучения (черная кривая), при подаче ВЧ напряжения $V_{pkpk}^{idt} = 3960$ мВ на частоте 1.131 МГц на ВШП (красная кривая) и на образец $V_{pkpk}^{s} = 4520$ мВ (синяя кривая). $L = 740$ мкм

этом остается неясным вопрос, какое именно ВЧ поле воздействует на ВЗП: акустическое или электрическое.

На кривых, представленных на рис. 3, напряжение V_{pkpk}^{s}, подаваемое на образец, подобрано так, что ширина пика R_d вблизи $V = 0$ (0-й СШ) оказывается такой же, как при подаче V_{pkpk}^{idt} на ВШП. В работах [26–29] при этом зависимости $R_d(V)$ практически совпадали. В данном случае качественное отличие воздействия V_{pkpk}^{idt} от V_{pkpk}^{s} очевидно. Хотя в обоих случаях наблюдается снижение V_t, при воздействии акустической волны спад R_d происходит более плавно, т.е. депиннинг ВЗП происходит менее когерентно. На кривых $R_d(I)$ видны также 1-я СШ$_W$ и субгармоника (СШ$_W$ #1/2). Как и 0-я, эти СШ$_W$ оказываются шире, чем СШ$_V$. Качественно такое же отличие электрических и механических СШ, особо явное для 0-й СШ, можно заметить на ВАХ, приведенных в [19, 25, 30] и в дополнительных материалах к этим работам.

Рисунок 4 иллюстрирует воздействие на ВАХ более высокочастотных колебаний, на резонансной частоте $f = 9.361$ МГц (см. рис. 2), соответствующей моде SH1. СШ наблюдаются при более высоких токах. На вставке показаны увеличенные 1-е СШ. На СШ$_W$ можно различить несколько пиков. Такую структуру СШ$_W$ можно связать с разбиением ВЗП на домены, скользящие с немного различающимися скоростями. СШ$_V$ заметно у́же. Таким образом, как и на частоте 1.131 МГц, при синхронизации ВЗП с волной ее скольжение происходит менее когерентно, чем при воздействии СВЧ поля.

Синхронизация скольжения ВЗП наблюдалась также при возбуждении лэмбовских волн на часто-

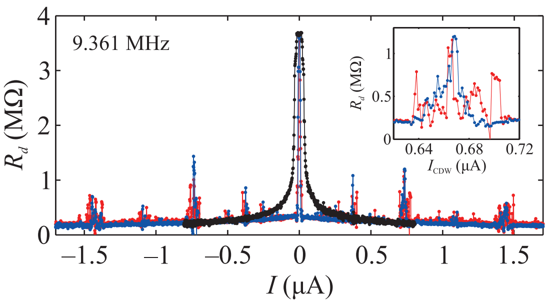

Рис. 4. (Цветной онлайн) Зависимости $R_d(I)$ без облучения (черная кривая), при подаче ВЧ напряжения $V^{idt}_{pkpk} = 1400$ мВ на частоте 9.361 МГц на ВШП (красная кривая) и на образец $V^s_{pkpk} = 1600$ мВ (синяя кривая). На вставке – увеличенный фрагмент зависимости R_d от *нелинейного* тока $I_{\rm CDW}$ в области 1-х СШ. $L = 740$ мкм

тах 6.02 и 16.685 МГц, соответствующих модам S_1 и S_3. И в этих случаях СШw были шире, чем СШ$_{\rm V}$.

Как и в [25, 30], были исследованы амплитудные зависимости величин СШ. На рис. 5 приведены зависимости V_t, т.е. полуширины 0-й СШ, от V^s_{pkpk} и V^{idt}_{pkpk} для двух мод. На вставках те же зависимости показаны в полулогарифмическом масштабе. Для наилучшего совмещения кривых на начальных участках мы домножили напряжение V^{idt}_{pkpk} на подгоночный коэффициент. В обоих случаях коэффициент близок к 1. Видно, что с ростом ВЧ напряжений кривые $V_t(V^s_{pkpk})$ и $V_t(V^{idt}_{pkpk})$ расходятся. Как и в [25], $V_t(V^s_{pkpk})$ резко падает, в то время как на зависимости $V_t(V^{idt}_{pkpk})$ очевидна тенденция к замедлению падения с ростом V^{idt}_{pkpk}. По сравнению с [25] относительные изменения V_t гораздо больше, что объясняется возможностями данной методики: если приложение максимального напряжения 7 В (действующее значение) к пьезоактюаторам понижает V_t лишь на 25 % [25], приложение такого же V^{idt}_{pkpk} к ВШП понижает V_t на 1–1.5 порядка. Подавление же V_t на 25 % наблюдается при $V^{idt}_{pkpk} < 0.5$ В (рис. 5).

Таким образом, качественное отличие амплитудных зависимостей V_t при воздействии электрического ВЧ поля и акустической волны такое же, как наблюдалось в [25] при сравнении электрических и механических колебаний. То же можно сказать и про отличие форм ненулевых СШ$_{\rm W}$ от СШ$_{\rm V}$. Это видно из рис. 6а, на котором приведены амплитудные зависимости ширины 1-й СШ на частоте 1.131 МГц. Для определения ширины δV этой СШ оценивалась площадь под ней на кривой $R_d(I)$. Хотя раздробленность СШ, вызванных V^{idt}_{pkpk}, (рис. 3), затрудняет однозначное определение их ширин, качественное отличие зависимостей δV от V^{idt}_{pkpk} и от V^s_{pkpk} очевидно (рис. 6а).

Из приведенных результатов, казалось бы, можно сделать вывод, что воздействие акустической волны на динамику ВЗП в TaS_3 связано с деформационным полем волны. Однако дальнейший анализ полученных результатов не позволил нам сделать такое заключение. Заметим, что на зависимостях $V_t(V^{idt}_{pkpk})$ видна тенденция к осцилляциям (рис. 5), которые, согласно [21, 25], являются отличительной чертой $V_t(V^s_{pkpk})$. Еще более выраженные осцилляции ширин СШ в зависимости от мощности ПАВ наблюдались в [30]. При модуляции потенциала пиннинга такое невозможно. Авторы [21] называют это воздействие на ВЗП "вертикальным", в отличие от "горизонтального" воздействия электрического поля. Впрочем, в более поздней работе тех же авторов [24] рассмотрено "горизонтальное" воздействие ПАВ на ВЗП. В этом случае модулируется не потенциал ППП, а положение центров пиннинга, и осцилляции ширин СШ$_{\rm W}$ возможны[5)].

Более существенная неоднозначность интерпретации поведения СШ$_{\rm W}$ возникает, если мы учтем, пространственную неоднородность поля (электрического или деформационного). В этом случае особенности структуры СШ$_{\rm W}$ и их амплитудных зависимостей можно связать с неоднородностью воздействия поля на ВЗП. Длина волны $\lambda = 3$ мм сравнима с расстоянием между контактами в образце, $L = 740$ мкм: $L \approx \frac{1}{4}\lambda$. Следовательно, поле существенно меняется на длине образца. Значительную часть времени оно даже имеет разный знак в разных частях образца. Это может способствовать разбиению ВЗП на домены, движущиеся с разными скоростями.

Для проверки влияния неоднородности ВЧ поля на вид ВАХ мы нанесли на тот же образец дополнительные контакты (рис. 1с). На трех сегментах с $L_{12} \approx 200$ мкм, $L_{23} \approx 160$ мкм и $L_{34} \approx 150$ мкм проведены измерения, аналогичные представленным на рис. 3–6. На рисунке 7 приведены ВАХ со СШ, индуцированными электрическим полем и акустической волной на частоте 6.02 МГц. Видно, что кривые $R_d(I)$ практически совпали, а различия между СШ$_{\rm W}$ и СШ$_{\rm V}$ практически исчезли. На трех других резо-

[5)] "Горизонтальное" воздействие на ВЗП видится вполне разумным в свете зависимости волнового вектора ВЗП от одноосной деформации вискера TaS_3 [20]. Перестройка ППП при изменении волнового вектора ВЗП иллюстрирует работа [32]. Учитывая температурную зависимость волнового вектора [33], мы можем сделать вывод, что при деформации $\sim 10^{-4}$ [19] конфигурация (т.е. фаза) ППП может существенно измениться, на величину порядка 2π. Если считать, что периодическое по времени изменение ППП относительно ВЗП эквивалентно колебаниям ВЗП в ППП, можно объяснить осцилляции ширин СШ$_{\rm W}$.

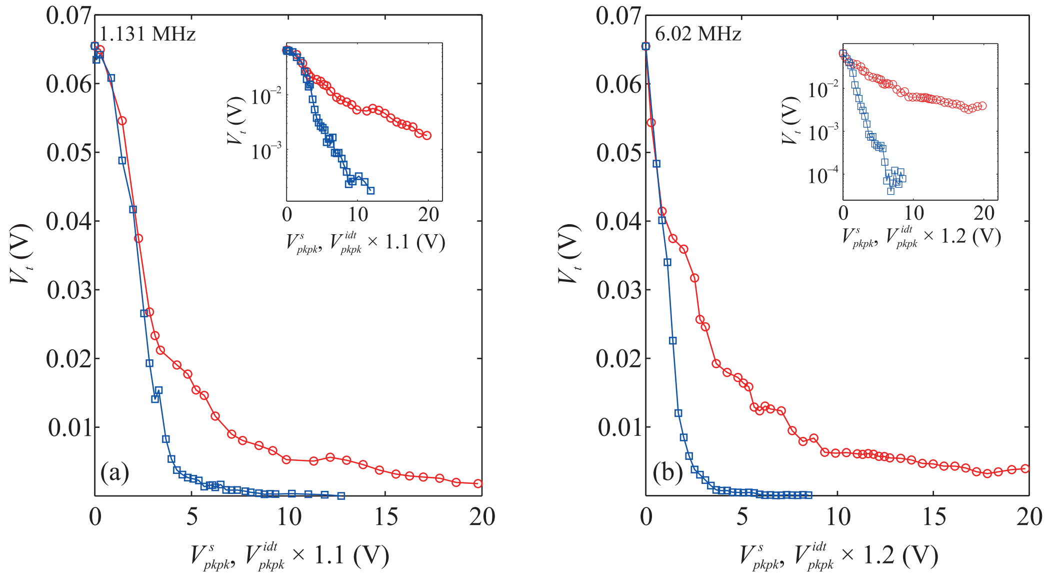

Рис. 5. (Цветной онлайн) Амплитудные зависимости величин порогового поля (0-й СШ) на частотах 1.131 МГц (a) и 6.02 МГц (b): ○ – зависимости от V^{idt}_{pkpk}, □ – зависимости от V^{s}_{pkpk}. Величины V^{idt}_{pkpk} домножены на постоянный коэффициент, подобранный для оптимального совпадения начальных участков зависимостей. На вставках – те же зависимости в полулогарифмическом масштабе. $L = 740$ мкм

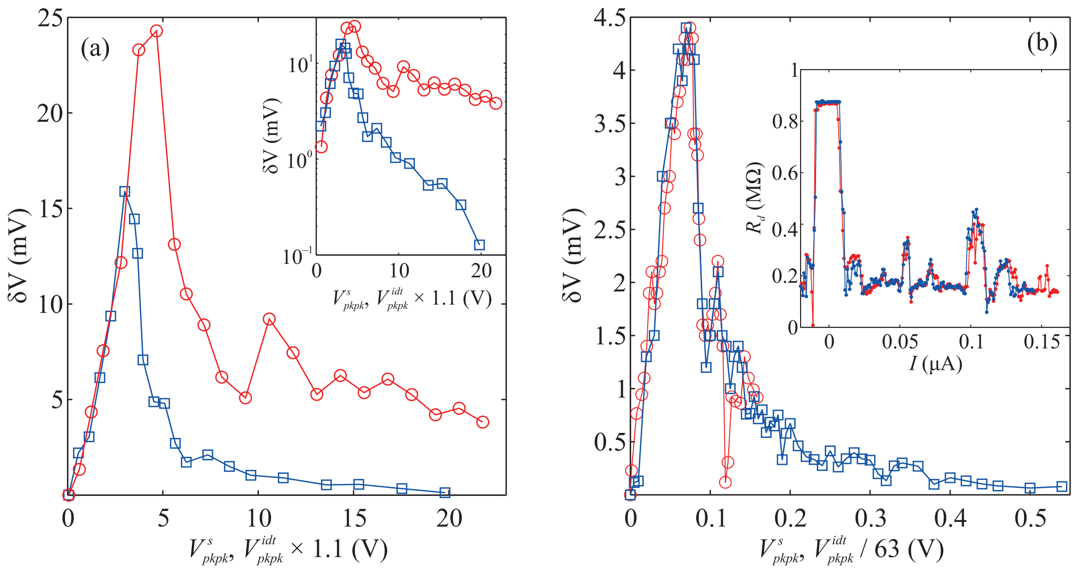

Рис. 6. (Цветной онлайн) Амплитудные зависимости ширины 1-й СШ при частоте 1.131 МГц. (a) – $L = 740$ мкм. (b) $L_{34} = 150$ мкм. ○ – зависимости от V^{idt}_{pkpk}; □ – зависимости от V^{s}_{pkpk}. Величины V^{idt}_{pkpk} домножены на постоянный коэффициент, подобранный для оптимального совпадения начальных участков зависимостей. На вставке к (a) – те же зависимости в полулогарифмическом масштабе. На вставке к (b) – фрагмент кривых $R_d(I)$ при подаче ВЧ напряжения $V^{idt}_{pkpk} = 3900$ мВ на ВШП (красная кривая) и на образец $V^{s}_{pkpk} = 60$ мВ (синяя кривая)

нансных частотах, 1.131, 9.361 и 16.685 МГц, получены аналогичные результаты. Исчезло и качественное отличие амплитудных зависимостей ширин как нулевых (вставка к рис. 7), так и первых (рис. 6b) СШ$_\mathrm{W}$ и СШ$_\mathrm{V}$. Аналогичные результаты были получены и на двух других коротких сегментах вискера, сформировавшихся в результате напыления дополнительных контактных полосок (рис. 1c). Таким образом, наблюдаемое нами отличие характеристик СШ$_\mathrm{W}$ и СШ$_\mathrm{V}$ (рис. 3–6) отражает пространственную неоднородность высокочастотного поля, действующего на ВЗП.

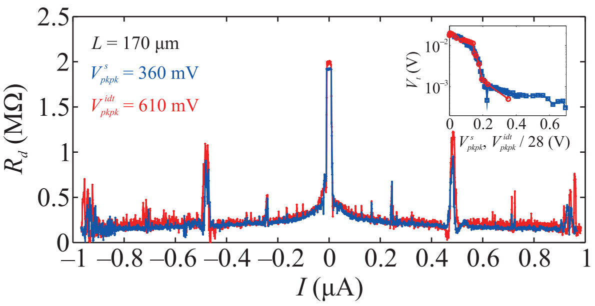

Рис. 7. (Цветной онлайн) Зависимость $R_d(I)$ для сегмента образца TaS_3 длиной $L_{23} = 160$ мкм при ВЧ воздействии на частоте 6.02 МГц. Синяя и красная кривые записаны при приложении ВЧ напряжения к образцу и к ВШП соответственно. На вставках показаны соответствующие амплитудные зависимости порогового напряжения (полуширины 0-х СШ)

На связь форм СШ$_\mathrm{W}$ с распределением полей вдоль образца указывает и зависимость вида ВАХ от расположения длинного образца относительно ВШП. На рис. 8 представлены две зависимости $R_d(I)$, снятые при возбуждении волн на частоте 6.02 МГц с помощью двух разных ВШП (рис. 1). Видно, что при почти одинаковом подавлении порогового тока, т.е. сходстве кривых $R_d(I)$ вблизи $I = 0$, формы кривых в целом заметно отличаются. Такое отличие можно связать со сложной пространственной структурой полей волн. Как показал наш расчет, распределение средней величины полей неоднородно по пластине и существенно зависит от расстояния до ВШП.

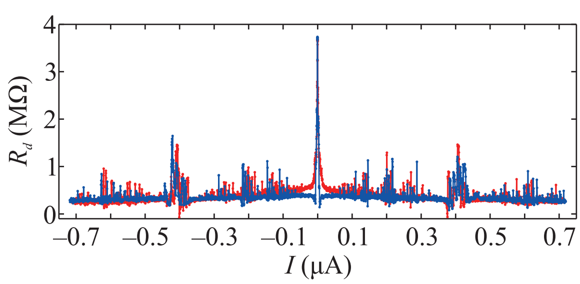

Рис. 8. (Цветной онлайн) Две зависимости $R_d(I)$ при подаче ВЧ напряжения $V^{idt}_{pkpk} = 2800$ мВ на частоте 6.02 МГц на ВШП. При записи синей кривой использовался альтернативный ВШП (см. рис. 1). $L = 740$ мкм

В связи с полученной связью вида $R_d(I)$ с распределением полей вдоль образца имеет смысл критически проанализировать также результат [25]. СШ, наблюдаемые при возбуждении резонансных мод колебаний в вискерах [19, 25], безусловно, имеют механическую природу. При этом деформация образцов имеет пространственную неоднородность, определяемую модой колебаний. Мы не можем исключить, что именно эта неоднородность определяет особенности вида "механических" СШ и их амплитудных зависимостей [25]. Наблюдаемые в [30] отличия СШ, индуцированных СВЧ напряжением и ПАВ, также могут быть связаны с неоднородностью электрического поля на длине образца. В [30] при длине волны ПАВ $\lambda = 13.2$ мкм, расстояния между токовыми и потенциальными контактами во всех структурах были сравнимы с λ, т.е. условие $L \ll \lambda$ не выполнялось. Поскольку в [30] доказательство механической природы СШ, индуцированных ПАВ, основано на особенностях их вида и амплитудных зависимостей, для окончательного выяснения их происхождения, на наш взгляд [34], требуются дальнейшие исследования. Вместе с тем, работы [19, 25, 30], вероятно, представляют собой первые сообщения о СШ, возникающих при воздействии на ВЗП неоднородного ВЧ-СВЧ поля (в [19, 25] – механического, в [30] – механического и/или электрического), а данная работа – первое исследование влияния неоднородности ВЧ поля на динамику ВЗП.

В заключение, нами показана возможность синхронизации скольжения ВЗП с полем акустических волн в ниобате лития. Если длина волны λ сравнима с длиной образца L, в режиме синхронизации наблюдается менее когерентное скольжение ВЗП, чем при синхронизации с ВЧ напряжением, приложенным непосредственно к образцу. В случае же $L \ll \lambda$ различия между воздействиями волны и напряжения практически исчезают. Таким образом, продемонстрированы особенности воздействия пространственно-неоднородного ВЧ поля на динамику ВЗП. Вместе с тем, остается невыясненным вопрос, какая именно компонента волн приводит к возникновению СШ$_\mathrm{W}$ – электрическая или деформационная.

С практической точки зрения, результат открывает широкие возможности исследования воздействия механических колебаний в пьезоэлектрических материалах на динамику ВЗП. В основе приготовленных нами структур – элементы акустоэлектроники, технология приготовления которых хорошо отработана. Планарный характер структур делает их потенциальными элементами микро- и наноэлектромеханических структур. Как показано в работах [26–30], синхронизация ВЗП возможна и с ПАВ, в том числе в наноразмерных образцах и на частотах вплоть до гигагерцового диапазона [30].

Авторы благодарны С. В. Зайцеву-Зотову за плодотворное обсуждение работы.

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда # 25-29-00876.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

---

1. P. Monceau, "Electronic crystals: an experimental overview", Adv. Phys. **61**, 325 (2012).
2. S. Brown and A. Zettl, *Charge Density Wave Current Oscillations and Interference Effects, in Charge DensityWaves in Solids*, ed. by L.P. Gor'kov and G. Gruner (Elsevier, Amsterdam, North-Holland, 1989), v. 25, p. 223.
3. S.G. Zybtsev, S.A. Nikonov, V.Ya. Pokrovskii, V.V. Pavlovskiy, and D. Staresinic, "Step-by-step advancement of the charge-density wave in the rf-synchronized modes and oscillations of Shapiro steps' width vs. rf power", Phys. Rev. B **101**, 115425 (2020).
4. 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.
5. G. Mozurkewich, "Phase-relaxation interpretation of elastic softening induced by sliding charge-density waves", Phys. Rev. B **42**, 11183 (1990).
6. J.W. Brill and W. Roark, "Electric Field Dependence of Elastic Properties of TaS_3", Phys. Rev. Lett. **53**, 846 (1984).
7. X.-D. Xiang and J.W. Brill, "Shear modulus of TaS_3", Phys. Rev. B **36**, 2969 (1987).
8. L.C. Bourne, M.S. Sherwin, and A. Zettl, "Elastic Properties of Charge-Density-Wave Conductors: ac-dc Electric Field Coupling", Phys. Rev. Lett. **56**, 1952 (1986).
9. R.L. Jacobsen and G. Mozurkewich, "Stiffness reduction associated with charge-density-wave sliding: Temperature and bias dependences in TaS_3", Phys. Rev. B **42**, 2778 (1990).
10. Z.G. Xu and J.W. Brill, "Uniaxial-strain dependence of shear-modulus anomalies in TaS_3", Phys. Rev. B **43**, 11037 (1991).
11. S. Hoen, B. Burk, A. Zettl, and M. Inui, "Metastable length states of a random system: TaS_3", Phys. Rev. B **46**, 1874 (1992).
12. A.V. Golovnya, V.Ya. Pokrovskii, and P.M. Shadrin, "Coupling of the Lattice and Superlattice Deformations and Hysteresis in Thermal Expansion for the Quasi-One-Dimensional Conductor TaS_3", Phys. Rev. Lett. **88**, 246401 (2002).
13. V.Ya. Pokrovskii, S.G. Zybtsev, and I.G. Gorlova, "Torsional Strain of TaS_3 Whiskers on the Charge-Density Wave Depinning", Phys. Rev. Lett. **98**, 206404 (2007).
14. V.Ya. Pokrovskii, S.G. Zybtsev, V.B. Loginov, V.N. Timofeev, D.V. Kolesov, I.V. Yaminsky, and I.G. Gorlova, "Deformations of charge-density wave crystals under electric field", Physica B **404**, 437 (2009).
15. J. Nichols, D. Dominko, L. Ladino, J. Zhou, and J.W. Brill, "Characterization of the torsional piezoelectriclike response of tantalum trisulfide associated with charge-density-wave depinning", Phys. Rev. B **79**, 241110R (2009).
16. С.Г. Зыбцев, М.В. Никитин, В.Я. Покровский, "Ступеньки Шапиро в кручении квазиодномерного проводника TaS_3", Письма в ЖЭТФ **92**, 448 (2010) [S.G. Zybtsev, M.V. Nikitin, and V.Ya. Pokrovskii, "Shapiro Steps in the Torsion of a Quasi-One-Dimensional Conductor TaS_3", JETP Lett. **92**, 405 (2010)].
17. В.Я. Покровский, С.Г. Зыбцев, М.В. Никитин, И.Г. Горлова, В.Ф. Насретдинова, С.В. Зайцев-Зотов, "Высокочастотные, "квантовые" и электромеханические эффекты в квазиодномерных кристаллах с волной зарядовой плотности", УФН **183**, 33 (2013) [V.Ya. Pokrovskii, S.G. Zybtsev, M.V. Nikitin, I.G. Gorlova, V.F. Nasretdinova, and S.V. Zaitsev-Zotov, "High-frequency, "quantum" and electromechanical effects in quasi-one-dimensional charge density wave conductors Phys.-Uspekhi **56**, 29 (2013)].
18. V.Ya. Pokrovskii, M.V. Nikitin, and S.G. Zybtsev, "Self-Detection of Mechanical Oscillations of Charge-Density Wave Conductors", Physica B **460**, 39 (2015).
19. M.V. Nikitin, S.G. Zybtsev, V.Ya. Pokrovskii, and B.A. Loginov, "Mechanically induced Shapiro steps: Enormous effect of vibrations on the charge-density wave transport", Appl. Phys. Lett. **118**, 223105 (2021).
20. S.G. Zybtsev and V.Ya. Pokrovskii, "Quantization of states and strain-induced transformation of charge-density waves in the quasi one-dimensional conductor TaS_3", Phys. Rev. B **94**, 115140 (2016).
21. Y. Funami and K. Aoyama, "Fractal and subharmonic responses driven by surface acoustic waves during charge density wave sliding", Phys. Rev. B **108**, L100508 (2023).
22. Y. Wei and Y. Lei, "Shapiro steps and chaos in the Frenkel-Kontorova model with substrate lateral vibration", Phys. Rev. E **106**, 044204 (2022).
23. M. Mori and S. Maekawa, "Shapiro steps in charge-density-wave states driven by ultrasound", Appl. Phys. Lett. **122**, 042202 (2023).
24. Y. Funami and K. Aoyama, "Effects of frequency mixing on Shapiro-step formations in sliding charge-density-waves", New Physics: Sae Mulli **73**, 1086 (2023).
25. М.В. Никитин, В.Я. Покровский, Д.А. Кай, С.Г. Зыбцев, "О принципиальном отличии воздействия электрических и механических колебаний на динамику волны зарядовой плотности",

Письма в ЖЭТФ **118**, 854 (2023) [M. V. Nikitin, V. Ya. Pokrovskii, D. A. Kai, and S. G. Zybtsev, "On the Fundamental Difference between the Effects of Electrical and Mechanical Vibrations on the Dynamics of a Charge Density Wave", JETP Lett. **118**, 854 (2023)].

26. М. В. Никитин, В. Я. Покровский, С. Г. Зыбцев, В. В. Колесов, В. В. Кашин, "Воздействие высокочастотных механических колебаний на транспортные свойства квазиодномерных проводников", XV Российская конференция по физике полупроводников, Нижний Новгород, 3–7 октября 2022 года. Сб. тезисов, с. 398. [M. V. Nikitin, V. Y. Pokrovskii, S. G. Zybtsev, V. V. Kolesov, and V. V. Kashin, "The Effect of High-Frequency Mechanical Vibrations on the Transport Properties of Quasi-One-Dimensional Conductors", XV Russian Conference on Semiconductor Physics, Nizhny Novgorod, October 3–7, 2022. Abstracts, p. 398] [in Russian]; https://semicond2022.ru/file/29/b86bdcf0/abstracts.pdf.

27. М. В. Никитин, В. Я. Покровский, Д. А. Кай, С. Г. Зыбцев, В. В. Колесов, В. В. Кашин, "Ступеньки Шапиро при синхронизации волны зарядовой плотности акустическими волнами", XX Конференция "Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления" ФИАН, г. Москва, 25 мая 2023 г., Сб. тезисов (Институт компьютерных исследований, М., Ижевск, 2023), с. 138; ISBN 978-5-4344-0993-3 [M. V. Nikitin, V. Ya. Pokrovskii, D. A. Kai, S. G. Zybtsev, V. V. Kolesov, and V. V. Kashin, "Shapiro steps in synchronization of a charge density wave by acoustic waves", XX Conference "Strongly Correlated Electron Systems and Quantum Critical Phenomena", Lebedev Physical Institute, Moscow, May 25, 2023, ABSTRACTS, (Institute of Computer Research, Moscow, Izhevsk, 2023), p. 138] [in Russian]; https://sces.lebedev.ru/wp-content/uploads/2023/07/SCES_A5.pdf.

28. М. В. Никитин, В. Я. Покровский, Д. А. Кай, С. Г. Зыбцев, В. В. Колесов, В. В. Кашин, "Ступеньки Шапиро при синхронизации волны зарядовой плотности электрическими и акустическими колебаниями", 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) [M. V. Nikitin, V. Ya. Pokrovskii, D. A. Kai, S. G. Zybtsev, V. V. Kolesov, and V. V. Kashin, "Shapiro steps at the synchronization of a charge density wave by electric and acoustic oscillations", ABSTRACTS of the III International Conference "Physics of Condensed Matter" FKS-2023, ed. by Dr. Sci. (Physics and Mathematics) B. B. Straumal (Chernogolovka, May 29 – June 2, 2023), p. 139] [in Russian]; http://www.issp.ac.ru/fks2023/assets/files/Abstract_FKS_7.pdf.

29. М. В. Никитин, В. Я. Покровский, Д. А. Кай, С. Г. Зыбцев, "Динамика волны зарядовой плотности в условиях электрических и механических колебаний", Труды XXVIII Международного симпозиума, 11–15 марта 2024 г., Н. Новгород, ИПФ РАН, т. 2, с. 759; ISBN 978-5-8048-0124-4 [M. V. Nikitin, V. Ya. Pokrovskii, D. A. Kai, and S. G. Zybtsev, "Dynamics of the charge density wave under electrical and mechanical vibrations", Proceedings of the XXVIII International Symposium, March 11–15, 2024, Nizhny Novgorod, IAP RAS, ISBN 978-5-8048-0124-4, v. 2, p. 759] [in Russian].

30. K. Fujiwara, T. Kawada, N. Nikaido, J. Park, N. Jiang, Sh. Takada, and Y. Niimi, "Observation of Shapiro Steps in the Charge Density Wave State Induced by Strain on a Piezoelectric Substrate", Phys.Rev. Lett. **135**, 256304 (2025).

31. R. M. White and F. W. Voltmer, "Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves", Appl. Phys. Lett. **7**, 314 (1965).

32. S. V. Zaitsev-Zotov, V. Ya. Pokrovskii, and J. C. Gill, "Mesoscopic Behavior of the Threshold Voltage in Ultra-Small Specimens of o-TaS_3", J. Phys. I **2**, 111 (1992).

33. C. Roucau, "New results obtained by electron diffraction on the one-dimensional conductors TaS_3 and NbS_3", J. Phys. (Paris) Colloq. **44**, C3-1725 (1983).

34. D. Yu. Saltykova, M. V. Nikitin, V. Ya. Pokrovskii, S. G. Zybtsev, V. V. Kolesov, V. V. Kashin, I. E. Kuznetsova, and I. A. Nedospasov, "Comment on "Observation of Shapiro Steps in the Charge Density Wave State Induced by Strain on a Piezoelectric Substrate", arXiv:2603.23274 [cond-mat.mes-hall].