

**АНОМАЛИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ПРОВОДИМОСТИ
КВАЗИОДНОМЕРНОГО СОЕДИНЕНИЯ $m\text{-TaS}_3$ ВБЛИЗИ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПАЙЕРЛСОВСКОГО ПЕРЕХОДА**

B.E.Минакова¹⁾, Ю.И.Латышев, В.А.Волков

Институт радиотехники и электроники РАН

103907 Москва, Россия

Поступила в редакцию 2 августа 1995 г.

Обнаружен новый режим нелинейной проводимости пайерлсовского проводника $m\text{-TaS}_3$. Он существует в узком (≈ 5 К) температурном интервале вблизи температуры пайерлсовского перехода $T_{P2} = 157.5$ К и характеризуется появлением: а) двух сильно различающихся между собой пороговых напряжений на зависимости дифференциального кондактанса σ_d от постоянного напряжения V_{DC} , б) периодических по V_{DC} ступеней функции $\sigma_d(V_{DC})$ при наличии сильной ВЧ накачки, причем величина ступеней (40 кОм)⁻¹ сравнима с квантами кондактанса.

В квазиодномерных (квази-1D) проводниках при температуре ниже температуры пайерлсовского перехода T_P образуется трехмерно упорядоченное состояние с волной зарядовой плотности (ВЗП) [1]. В постоянном электрическом поле, при напряжениях V_{DC} , больших порогового V_t , ВЗП начинает двигаться, в результате чего появляется нелинейный вклад в проводимость и генерируется переменное поле, частота которого f_{CDW} пропорциональна току ВЗП I_{CDW} [2]. На эксперименте это проявляется, в частности, в появлении ступеней постоянного тока ВЗП ("ступеней Шапиро") на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) в присутствии высокочастотной (ВЧ) накачки с частотой f при условии $f_{CDW}/f = p/q$ (где p, q – целые числа) [3]. На зависимости дифференциального кондактанса σ_d от V_{DC} этим ступеням соответствуют резкие резонансные провалы. При приближении снизу к T_P вклад ВЗП в общую проводимость уменьшается, так как концентрация электронов $n_s \propto I_{CDW}/f$, сконденсированных в ВЗП, сильно падает [4, 5]. Кроме того, когерентность движущейся ВЗП все сильнее нарушается из-за нарастания 1D флюктуаций [6]. Механизм "плавления" ВЗП мало изучен.

Первоначальная цель работы состояла в исследовании этого механизма. Была детально измерена зависимость $\sigma_d(V_{DC})$ во флюктуационной области температур вблизи T_P . Было обнаружено, что в некотором интервале температур характер зависимостей $\sigma_d(V_{DC})$ как при накачке, так и без нее, качественно изменяется.

Было выбрано сравнительно малоисследованное соединение $m\text{-TaS}_3$, которое интересно высокой степенью одномерности (отношение проводимостей вдоль и поперек 1D-цепочек достигает 2000 [7] при $T \approx T_{P2}$). Это соединение имеет два пайерлсовских перехода, $T_{P1} = 235$ К и $T_{P2} = 157.5$ К. Все измерения были проведены вблизи температуры нижнего пайерлсовского перехода. Пороговое поле срыва ВЗП составляло 1.8 В/см при $T = 139$ К. Дифференциальный кондактанс измерялся обычной модуляционной техникой на частоте 700 Гц при амплитуде модуляции 1 мВ. На рис. 1–5 изображены результаты исследования образца $m\text{-TaS}_3$, имеющего размеры $1 \times 0.01 \times 0.003$ мм.

¹⁾e-mail: mina@web.cplire.ru

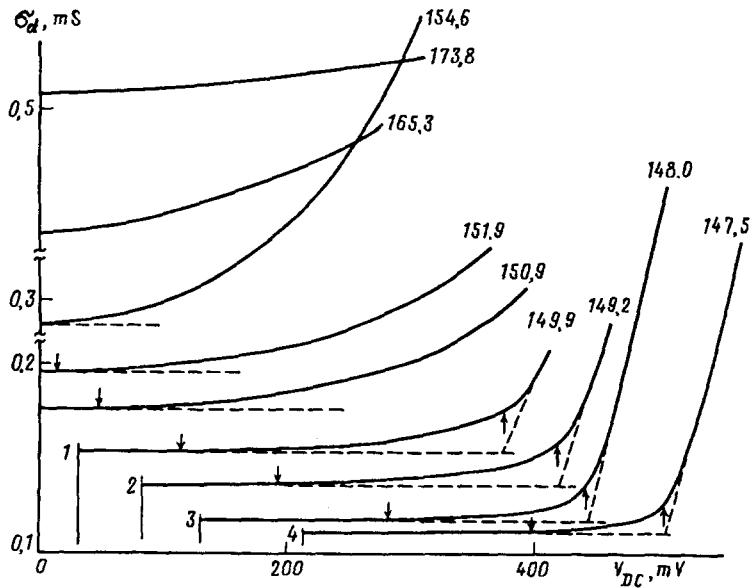


Рис.1. Зависимости дифференциального кондактанса от напряжения $\sigma_d(V_{DC})$ при различных температурах выше и ниже $T_{P2} = 157.5$ К. Стрелки, направленные вверх, показывают значения верхнего порогового напряжения V_{t1} , стрелки, направленные вниз, - значения нижнего порогового напряжения V_{t2} . Кривые 1-4 сдвинуты вправо по оси абсцисс

Начнем с обсуждения результатов, полученных в отсутствие ВЧ накачки, рис.1, 2. При приближении к $T_0 = 146.8$ К на зависимостях $\sigma_d(V_{DC})$ проявляются два пороговых напряжения с качественно различным температурным поведением (способ определения верхнего (V_{t1}) и нижнего (V_{t2}) пороговых напряжений ясен из рис.1). В области напряжений $V_{DC} > V_{t2}$ включается новый механизм нелинейной проводимости. С ростом T , начиная с T_0 , пороговое напряжение для включения этого механизма V_{t2} резко падает²⁾ достигая нуля при $T = T^* = 152$ К. Выше T^* кривая $\sigma_d(V_{DC})$ нелинейна во всем исследованном диапазоне напряжений. Интересно, что кривизна этой кривой увеличивается с ростом T , пока $T < T_{P2}$, достигает максимума при $T = T_{P2}$, а затем уменьшается с ростом T при $T > T_{P2}$.

Рассмотрим поведение $\sigma_d(V_{DC})$ в интервале $T_0 < T < T^*$ при наличии ВЧ накачки. Оказывается [5], что именно при $T \geq T_0$ функция $n_s(T)$ начинает резко падать. На рис.3 показано поведение $\sigma_d(V_{DC})$ при наличии ВЧ накачки частоты $f = 5$ МГц и амплитуды $V_{RF} = 1$ В. ВЧ поле подавалось на те же токовые контакты, что и V_{DC} . С возрастанием температуры характер особенностей качественно изменяется: вместо обычных резонансных провалов (или наряду с ними) на зависимостях $\sigma_d(V_{DC})$ появляется множество ступенек. Эти ступеньки появляются сначала в области больших напряжений и существуют с резонансными провалами, соответствующими ступеням Шapiro на ВАХ и наблюдающимися в области малых значений V_{DC} . С ростом T

²⁾Появление двух пороговых напряжений наблюдалось в m -TaS₃ при очень низких температурах (ниже 80К) в работе [8], однако нижнее пороговое напряжение при этом увеличивалось с ростом T .

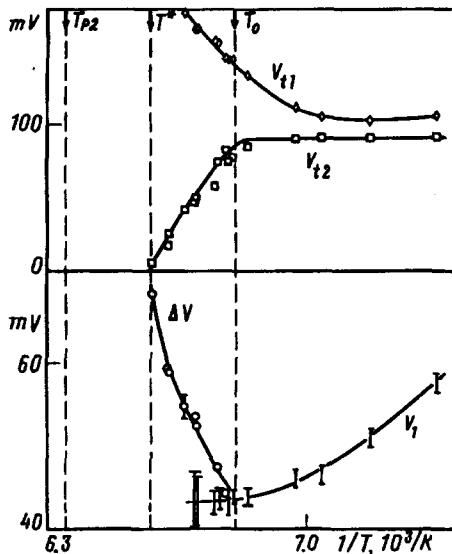


Рис.2. Температурные зависимости величин верхнего (V_{t1}) и нижнего (V_{t2}) пороговых напряжений, периода ступеней по напряжению ΔV и напряжения V_1 , соответствующего положению основного резонансного провала с $p/q = 1/1$. Характерные температуры: $T_{P2} = 157.5\text{K}$ – температура пайерлсовского перехода; $T^* = 152\text{K}$ – температура, при которой исчезает нижний порог V_{t2} ; $T_0 = 146.8\text{K}$ – температура, выше которой величины V_{t2} и ΔV начинают резко уменьшаться

ступени проявляются во всем исследованном диапазоне V_{DC} , а резонансные провалы исчезают (при $T > 149.9\text{K}$). Назовем наиболее ярко выраженные ступени "большими". Эти ступени расположены приблизительно на одних и тех же эквидистантных по σ_d уровнях. С уменьшением T в промежутках между большими ступенями появляются "маленькие" ступеньки.

Пронумеруем отдельно большие и маленькие ступени в порядке их появления на зависимости $\sigma_d(V_{DC})$. Для некоторых температур на зависимостях $\sigma_d(V_{DC})$ наблюдается до 5 больших и 5 маленьких ступеней. Ширина плато уменьшается как с ростом номера ступени n , так и с ростом T .

Для каждой температуры график зависимости положения центров больших ступеней V_n по оси напряжений как функция номера большой ступени n имеет линейный вид с наклоном, равным наклону аналогичного графика для малых ступеней. Следовательно, мы можем построить единый график $V_n(n)$, на котором маленькие ступени будут соответствовать дробным номерам на шкале n , рис.4. Все зависимости $V_n(n)$, линейны, причем период появления ступеней ΔV увеличивается от 44 мВ до 70 мВ с ростом T от 147.5 К до 151.9 К.

Построенные по той же схеме графики зависимостей значений $\sigma_d(V_n)$ как функции номера ступени n приведены на рис.5. Все эти зависимости также линейны по n , однако наклон прямых не зависит от T . Изменение $\sigma_d(V_n)$ на каждой ступени ($\Delta\sigma_d$) равно $(40\text{k}\Omega)^{-1}$. Более того, как видно из рис. 3 и 5, абсолютные положения плато (на оси σ_d), отвечающих большим ступеням, практически не зависят от T .

Обнаруженные ступени отличаются от слабо выраженных резонансных провалов, соответствующих ступеням Шапиро на ВАХ. Во-первых, ступени $\sigma_d(V_{DC})$ периодичны по напряжению, тогда как резонансные провалы периодичны по току ВЗП. Во-вторых, эти два типа особенностей $\sigma_d(V_{DC})$ могут существовать (см. рис.2, 3). В-третьих, они совершенно по-разному зависят от T (рис.2).

Отметим, что значение $\Delta V(T)$, нормированное на величину верхнего порога $V_{t1}(T)$, не зависит от T : $\Delta V/V_{t1} = 0.15$ во всем температурном интервале, в

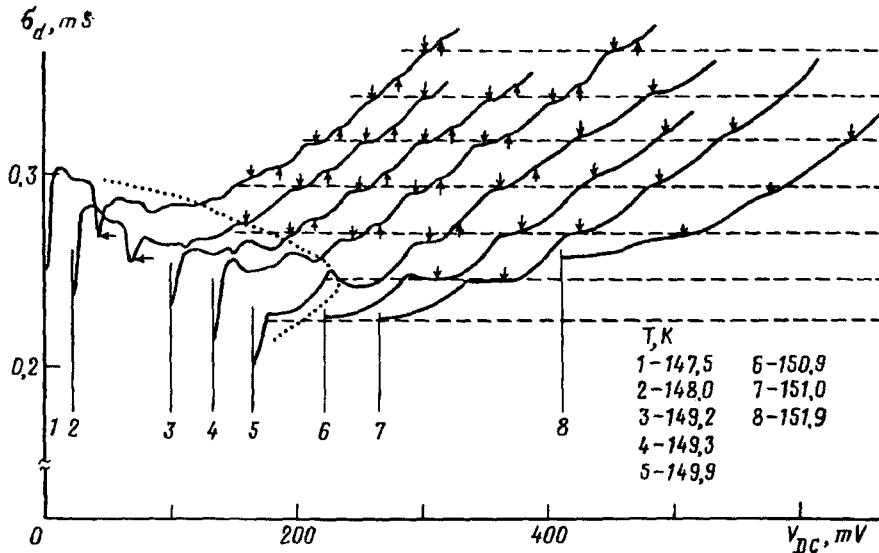


Рис.3. Зависимости дифференциального кондактанса σ_d от постоянного напряжения V_{DC} для разных температур в присутствии ВЧ накачки. Кривые 2-8 смещены вправо по оси V_{DC} . Стрелками, направленными вниз, помечены большие ступени, стрелками вверх – маленькие ступени. В области малых напряжений (ограниченной точечной линией) наблюдаются резонансные провалы, соответствующие ступеням Шапиро на ВАХ. Горизонтальными стрелками помечен резонансный провал с $p/q = f_{CDW}/f = 1/1$

котором удалось наблюдать одновременно ступени на $\sigma_d(V_{DC})$ в присутствии ВЧ поля и V_{t1} в его отсутствие³⁾. Это говорит о том, что обнаруженные ступени как-то связаны с движением ВЗП.

Таким образом, в интервале температур $T_0 < T < T^*$ вблизи T_{P2} на зависимостях $\sigma_d(V_{DC})$ в отсутствие ВЧ поля проявляются два пороговых напряжения. Большее из них, V_{t1} , возрастающее с увеличением T , соответствует срыву ВЗП, меньшее, V_{t2} , резко убывающее с увеличением температуры, – включению нового механизма проводимости. В присутствии ВЧ накачки обнаружено ступенеобразное поведение $\sigma_d(V_{DC})$ в том же интервале температур. Ступени в $\sigma_d(V_{DC})$ периодичны по напряжению с периодом ΔV и по дифференциальному кондактансу с периодом $\Delta\sigma_d$. Величина $\Delta\sigma_d$ не зависит от T и почти в 3 раза меньше кванта $2e^2/h$, проявляющегося при квантовании баллистического кондактанса квази-1D сужений в полупроводниковых структурах с 2D электронным газом при гелиевых температурах [9, 10]. Природа эффекта непонята. Можно, тем не менее, предположить, что при $T \geq T_0$ начинают рождаться какие-то возбуждения ВЗП, которые начинают проводить при $V \geq V_{t2}$. По-видимому, при синхронизирующем воздействии ВЧ накачки проявляются их квантовые свойства. Для выяснения природы этих возбуждений необходимы дополнительные исследования, как экспериментальные, так и теоретические.

Работа докладывалась на Международной Школе [11]. Один из авторов (В.Е.М.) выражает благодарность участникам школы, особенно С.Бразовскому, G.Grüner, C.Dekker, P.B.Littlewood, P.Monceau, W.Wonneberger за проявленный

³⁾ В исследованном диапазоне V_{DC} нам удалось определить V_{t1} только до $T = 149.9$ К.

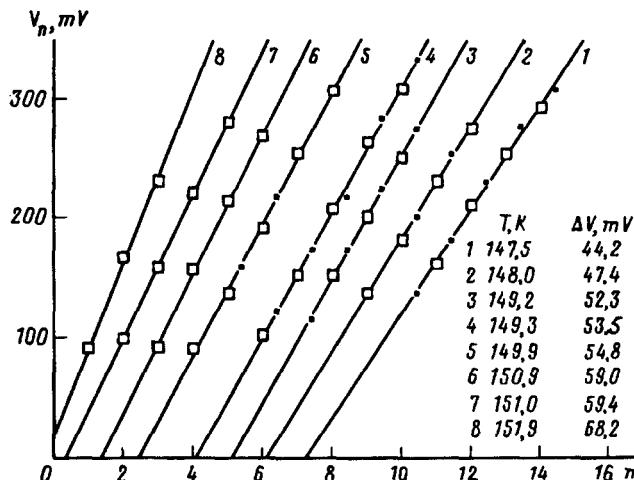


Рис.4. Зависимости положения центра ступеней по оси напряжений как функции номера ступени n при различных T . Большие квадраты соответствуют большим ступеням, малые квадраты - маленьким ступеням. Кривые 1-7 смещены по оси n

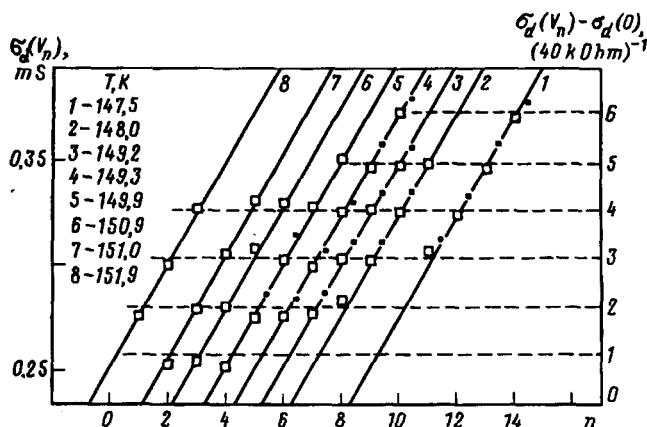


Рис.5. Дифференциальный кондактанс σ_d при $V_{DC} = V_n$ как функция номера ступени n в том же температурном интервале. Кривые 1-7 смещены по оси n . Большие квадраты - большие ступени, малые квадраты - маленькие ступени. Пунктирные горизонтальные линии соответствуют эквидистантным уровням с периодом $(40 \text{ кОм})^{-1}$

интерес к работе и полезные замечания. Авторы благодарны С.Н.Артеменко и М.Е.Гершензону за плодотворные обсуждения. Работа частично поддержана Международным научным фондом (грант M1Q000), INTAS (грант A92-056), а также МНТП РФ "Физика твердотельных наноструктур" (проект 1-018) и Российской фондом фундаментальных исследований (проект 95-02-04456)

-
1. G.Grüner, Rev. Mod. Phys. **60**, 1129 (1994).
 2. P.Monceau, J.Richard, and M. Renard, Phys. Rev. Lett. **45**, 43 (1980).
 3. A.Zettl and G.Grüner, Phys. Rev. B **29**, 755 (1984).
 4. S.E.Brown and G.Grüner, Phys. Rev.B **31**, 8302 (1985).
 5. Yu.I.Latyshev, V.E.Minakova, Ya.S.Savitskaya et al., Physica **143B**, 155 (1986).
 6. P.A.Lee, T.M.Rice, and P.W. Anderson, Phys. Rev. Lett. **31**, 462 (1973).
 7. Ю.И.Латышев, Я.С.Савицкая, В.В.Фролов, Тр. 2 Всесоюзного симпозиума "Неоднородные электронные состояния", Новосибирск, 1984, с.138.
 8. M.E.Itkis, F.Ya.Nad', and P.Monceau, Synthetic Metals **41-43**, 4037 (1991).
 9. B.J. Van Wees, H. van Houten, C.W.J.Beenakker et al., Phys. Rev. Lett. **60**, 848 (1988).
 10. D.A.Wharam, T.J.Thornton, R.Newbury et al., J. Phys. C. **21**, L209 (1988).
 11. Yu.I.Latyshev, V.E.Minakova, and V.A.Volkov, NATO ASI "Physics and Chemistry of Low Dimensional Inorganic Conductors", Les Houches, France, June, 1995. Abstracts, p.88.