

СОЛИТОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ И ПОЛЕВОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ КАПРОНАТА ГАЛЛИЯ $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_4 - \text{CO}_2\text{Tl}$.

*А.Э.Гвоздев, И.В.Криве, И.О.Кулик,
А.С.Рожавский*

В рамках представлений о солитонной проводимости волны зарядовой плотности проанализированы температурная и полевая зависимости электропроводности нового квазидвумерного проводника — капроната таллия. Получены значения параметров ϕ -солитонов.

Фаза пайерлсовского изолятора [1] в квазиодномерных и квазидвумерных кристаллах чувствительна к достаточно сильному электрическому полю E [2]. Электрическое поле стимулирует переход в металлическое состояние, что экспериментально проявляется в увеличении проводимости с ростом поля. В работе [2] отмечалась возможность перехода с образованием солитонов — локализованных возмущений параметра порядка. В [3] рассмотрены солитоны модуля параметра порядка, благодаря которым может реализоваться нелинейная проводимость в

легированном полиацетилене. Этот случай, равно как и рассмотренный в [2], реализуется только в случае строгого удвоения периода решетки. В работе [4] предложен механизм электропроводности, обязанный солитонным состоянием при несовпадении периода волны зарядовой плотности (ВЗП) и удвоенного периода решетки. Носителями заряда при этом служат солитоны фазы ВЗП (ϕ -солитоны). Известно, (см., например, [5]), что проводимость систем с ВЗП при низких температурах обнаруживает существенно нелинейную зависимость от электрического поля и температуры T . До сих пор существовали теории, объяснявшие такую зависимость лишь в пределе $T = 0$ [6] и высоких температур [4]. В данной работе рассматривается модель ϕ -солитонов [4, 6], динамика которых описывается уравнением *sine-Jordon*, однако выражения для проводимости, как функции E и T , получены в широком интервале изменения этих параметров¹⁾. Предпринята попытка сопоставить температурную и полевую зависимости солитонной проводимости с экспериментальными данными для нового квазидвумерного проводника — капроната таллия [7].

Согласно представлениям [6] проводимость ϕ -солитонов при низких температурах объясняется неустойчивостью основного состояния ВЗП в присутствии электрического поля, рождающего квантовым образом солитон-антисолитонные пары. Вероятность рождения пары солитон-антисолитон $P \sim \exp(-S)$, где S — действие, вычисленное с лагранжианом ВЗП [6] на экстремальной траектории. Для получения температурной зависимости P необходимо вычислить S на классе траекторий, периодических во мнимом времени [8]. Критический размер пары $\lambda_c = N E_\phi / 2 \pi e^* E = E_\phi / \epsilon$, где E_ϕ — энергия покоя солитона (антисолитона), N — показатель соизмеримости, e^* — эффективный заряд солитона. Солитонная проводимость нити длиной L имеет вид

$$\sigma_S = \frac{2}{N} (2\pi e^*)^2 \frac{c_0 \Lambda}{E_\phi d} \exp(-S), \quad (1)$$

где $\Lambda = \min\{L, l\}$, l — длина пробега солитона, $d = c_0 / \omega_0$ — размер солитона, ω_0 — частота пиннинга ВЗП, c_0 — скорость "фазовых фононов". Пользуясь методом работы [10], можно построить асимптотически точную процедуру нахождения экстремальных периодических во мнимом времени траекторий, отвечающих лагранжиану ВЗП. Выражение для S в области температур $T \ll \omega_0$ при этом имеет вид

$$S = \frac{2E_\phi}{\omega_0} \left\{ \gamma^{1/2} \frac{a^2}{4\gamma^{3/2}} + \frac{E_\phi}{\epsilon d} \left(\arcsin \sqrt{1 - a^2} + a \sqrt{1 - a^2} \right) \right\}, \quad (2)$$

где $\gamma = 3/2$, а a связана с температурой и полем соотношением:

$$\frac{\omega_0}{T} = \frac{2E_\phi}{\epsilon d} \sqrt{1 - a^2} + \gamma^{-1/2} \ln a^{-1} \quad (3)$$

¹⁾ Подробное изложение теоретических результатов будет опубликовано в журнале "Физика низких температур".

формула (2) допускает упрощение в пределе $T \ll T_q = \frac{2}{\pi} \frac{\epsilon c_0}{E\phi}$.

$$P \sim \exp \left\{ -\frac{2E\phi}{T_q} \left[1 - \frac{T_q}{\omega_0} (4\gamma^{3/2})^{-1} \exp\left(-2\gamma^{1/2} \frac{\omega_0}{T}\right) \right] \right\}, \quad (4)$$

а при $T_q < T \ll \omega_0$,

$$P \sim \exp \left\{ -\frac{2E\phi}{T} \left[1 - \frac{\pi^2}{48} \left(\frac{T_q}{T} \right)^2 \right] \right\}. \quad (5)$$

Выражение (4) совпадает с полученным в [6], экспонента (5) совпадает с приведенной в [4] и имеет "классическую" структуру однако предэкспоненциальный множитель в P см. (1) остается "квантовым". Заметим, что описание солитонной проводимости, как переноса заряда в газе термически рожденных солитон-антисолитонных пар [4], справедливо лишь при $T \sim E\phi > \omega_0$. При меньших температурах основной вклад в солитонную проводимость вносят процессы квантового рождения пар.

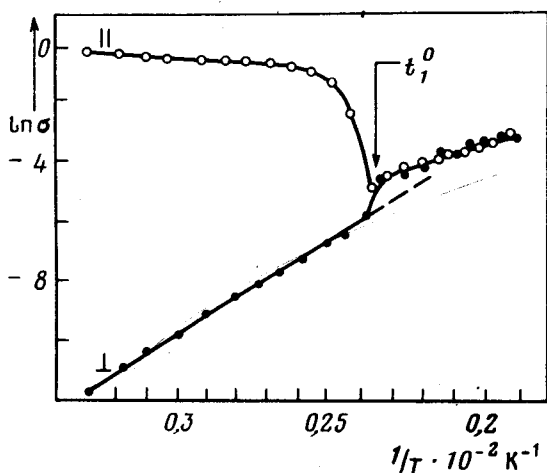


Рис. 1. Продольная σ_{\parallel} и поперечная σ_{\perp} проводимости капроната таллия в диапазоне температур 300 + 500К

Развитые представления попытаемся применить для объяснения аномалий температурной и полевой зависимости электропроводности капроната таллия: $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_4 - \text{CO}_2\text{Tl}$, структура которого, по-видимому, соответствует параллельным проводящим нитям, уложенным в слои, разделенные органической прослойкой. Синтез и идентификация этого соединения по методике, аналогичной [11], позволил получить более чистые образцы, чем исследованные нами ранее. Мелкокристаллический порошок переплавлялся в кварцевой откачанной ($p \sim 10^{-3}$ мм рт. ст.) и запаянной ампуле при температуре $T = 230 \pm 2^\circ\text{C}$ и медленно охлаждался (10 град/час), в результате чего были получены поликристаллы с размером зерна 2 + 6 мм. Такие крупные зерна позволили измерить анизотропию электропроводности $\sigma_{\parallel} / \sigma_{\perp}$ по компенсационной схеме двухзондовым методом. При комнатной температуре эта величина состав-

ляет $\sigma_{\parallel} / \sigma_{\perp} \sim 10^6$, $\sigma_{\parallel}^{293K} = 20 + 100 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$, при этом продольная проводимость носит металлический характер, а поперечная — полупроводниковый. Определенная из графика рис. 1 ширина щели составляет 5 эВ на участке $0 + 150^\circ\text{C}$ и ~ 3 эВ на участке $150 + 240^\circ\text{C}$. Определенные нами стандартным методом температуры плавления капроната таллия $T_1 = 150 \pm 1^\circ\text{C}$, соответствующая переходу в жидкокристаллическое состояние, и $T_2 = 223 \pm 1^\circ\text{C}$, соответствующая переходу в изотропную жидкость, хорошо согласуются с данными [11, 12]. При переходе из твердой фазы в жидкокристаллическую анизотропия электропроводности практически исчезает и зависимость $\sigma(T)$ становится полупроводниковой. Характерными особенностями температурной зависимости электропроводности при $4,2\text{K} \leq T \leq 300\text{K}$ являются (см. рис. 2): 1) ступенька с изменением наклона кривой при $T = 190\text{K}$, весьма напоминающая особенность, соответствующую образованию ВЗП в дихалькогенидах переходных металлов, NbSe_3 и в некоторых других низкоразмерных проводниках; 2) характерная неомическая особенность сопротивления, аналогичная наблюдаемой низкотемпературной особенности на NbSe_3 [5], подавляемая электрическим полем ($T \sim 40\text{K}$). Отсутствие ниже 40K температурной зависимости электросопротивления.

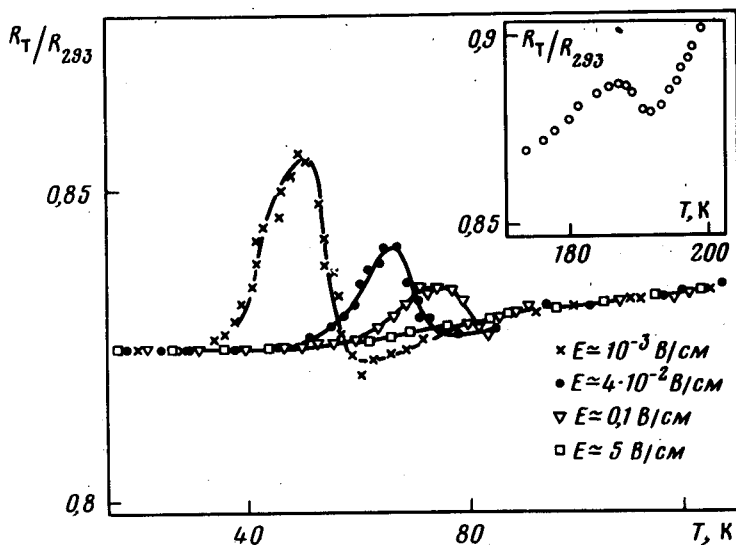


Рис. 2. Особенности относительного электросопротивления $R_T/R_{293\text{K}}$ капроната таллия при различных напряженностях электрического поля E

Для выделения солитонного вклада в проводимость и сравнения с экспериментом запишем солитонную составляющую проводимости в виде (см. (4)):

$$\sigma_S = \sigma_0 \exp\left\{-\frac{2E\phi}{T_q}\right\} = \sigma_0 \exp\left\{-\frac{E_0}{E}\right\}, \quad T < T_q \quad (6)$$

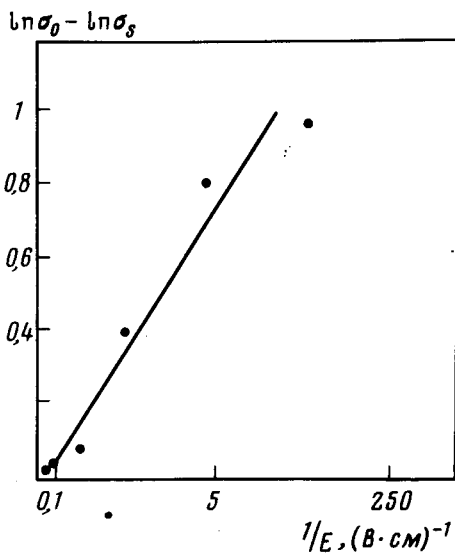


Рис. 3. Изменение нелинейной проводимости капроната таллия в области напряженностей электрического поля E , отвечающей условию $T < T_q$, как функция $1/E$

Из графика зависимости $(\ln \sigma_0 - \ln \sigma_s)$ от $1/E$ (рис. 3) определяем $E_0 = 0,2$ В/см. Величина E_0 связана с E_ϕ равенством $E_\phi = (2e^*E_0c_0/N)^{1/2}$. Предполагая $e^* \sim e$, $N \sim 1$, $c_0 \sim 10^7$ см/сек [6], а эффективную массу ВЗП $m^* \sim 10 - 100 m$, получаем $E_\phi \sim 10 - 100$ К. Температура T_q находится из формулы $T_q = 4e^*E_0c_0/NE_\phi$, где $E \sim 10$ В/см — напряженность поля, при которой исчезает нелинейная особенность электросопротивления при $T \sim 40$ К ($T_q \sim 10$ К). Величина E_ϕ , оцененная из температурной зависимости в области $T_q < T$ по формуле (5) по порядку величины совпадает с определенной из полевой зависимости. Точно выделить вклад термически возбужденных солитонов при $T_q < T$ не представляется возможным из-за узости интервала температур, на котором наблюдается аномалия $\Delta T \sim 20 - 30$ К. Величина T_q растет с увеличением E , что согласуется с тенденцией, определяемой из (4).

Таким образом, анализ полевой и температурной зависимости электропроводности капроната таллия позволяет привлечь для качественного объяснения экспериментальных данных представления о солитонной проводимости ВЗП в низкоразмерных системах с пайерлсовским переходом.

Физико-технический институт
низких температур
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
29 апреля 1980 г.

Литература

- [1] Н. Fröhlich. Proc. Roy. Soc., London, Ser. A223, 296, 1954.
- [2] И.О. Кулик. Письма в ЖЭТФ, 22, 73, 1975.
- [3] W.P. Su, J.R. Schrieffer, A.J. Heeger. Phys. Rev. Lett., 42, 1698, 1979; M.J. Rice. Phys. Lett., 71A, 152, 1979.
- [4] M.J. Rice, A.R. Bishop, J.A. Krumhansl, S.E. Trullinger. Phys. Rev. Lett., 36, 432, 1976.

- [5] M.J.Cohen, B.R.Newmann, A.J.Heeger. Phys. Rev. Lett., 37, 1500, 1976; R.Fleming, C.C.Grimes. Phys. Rev. Lett., 42, №21, 1979; P.Monceau, N.P.Ong, A.M.Portis, A.Meerschaut, J.Rouxel. Phys. Rev. Lett., 37, 602, 1976.
- [6] K.Maki. Phys. Rev. Lett., 39, 46, 1977.
- [7] А.Э.Гвоздев, А.А.Мамалуй. Кн. "Материалы 20-го Всесоюзного совещания по физике низких температур НТ-20" ч. 1, 160, 1979; А.Э. Гвоздев, А.А.Мамалуй. ФНТ, 5, 79, 1979.
- [8] Р.Фейнман, А.Хибс. Квантовая механика и интегралы по траекториям, М., изд. Мир, 1968.
- [9] S.Coleman. Phys. Rev., D15, 2929, 1977.
- [10] H.J.Katz. Phys. Rev. D17, 1056, 1978.
- [11] A.McKillop, D.Bromley, E.C.Taylor. J. of Org. Chem., 34, 1172, 1969.
- [12] R.Walter. Ber., 59B, 962, 1926.
-