

НЕЛИНЕЙНОСТИ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОКРИСТАЛЛА ТЕЛЛУРА В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОТЕМПЕРАТУРНОГО ЭФФЕКТА

Степуренко А. А., Алнев К. М., Абакарова Н. С.

Показано, что в условиях электротемпературного эффекта (ЭТЭ) на вольтамперных характеристиках (ВАХ) кристаллов теллура появляются нелинейные участки с различной зависимостью тока от напряжения. Анализ ВАХ $I = \frac{S}{L} \tau V$ и дифференциальной проводимости $dI/dV = I/V (1 + z)/(1 - z)$ ($z = \frac{S}{L} \eta V^2 d\tau/dT$) приводит к выводу, что наличие насыщения и падающего участка на ВАХ обусловлено явлением эксклюзии в теллуре.

Исследованию нелинейности вольтамперных характеристик (ВАХ) монокристалла теллура посвящено значительное количество работ [1-11].

Участки сублинейности, насыщения или отрицательной дифференциальной проводимости, наблюдаемые на ВАХ вследствие акустоэлектронного взаимодействия, появляются в электрических полях $E \sim 10^2$ В/см, определяемых величиной подвижности носителей заряда μ согласно выражению $\mu E_k = v_s$, где E_k — напряженность электрического поля, при котором начинается акустоэлектронное взаимодействие, v_s — скорость звука в кристалле. При этом время существования электрического поля E должно превышать время развития акустоэлектронного взаимодействия τ_ϕ . При меньших длительностях импульса электрического поля акустоэлектронное взаимодействие отсутствует, однако и в этом случае проявляется нелинейность ВАХ теллура, но уже обусловленная другими механизмами взаимодействия носителей и при более высоких электрических полях $E \sim 10^3$ В/см [10, 11], при которых становятся возможными переброс электронов в вышележащие по энергии долины, рассеяние горячих дырок, ударная ионизация. Эти методы исследований ВАХ теллура предусматривают отсутствие джоулева нагрева образца, что достигается использованием импульсов напряжения электрического поля малой длительности, когда под действием электрического поля существенно нарушается равновесие в системе носителей заряда, а разогрев решетки столь незначителен, что не играет принципиальной роли. Однако разогрев решетки за счет выделяющегося джоулева тепла при приложении к образцу медленно меняющегося электрического поля может оказать заметное влияние на форму ВАХ. Учет этого обстоятельства открывает дополнительные возможности получения ВАХ с падающим или возрастающим участком, возникающим вследствие определенной зависимости концентрации носителей, их подвижности или одновременно обоих параметров от температуры решетки [12, 13].

Целью настоящей работы является исследование ВАХ монокристаллов теллура при воздействии на них медленно меняющегося электрического поля, т. е. в условиях электротемпературного эффекта. Измерения проводились на образцах различной длины L и поперечных размеров S в X-, Y-, Z-кристаллографических направлениях при температуре 77 К. Токовыми служили припаянные индием или приваренные медные проволочки. На рис. 1 представлена схема электрических измерений. Соблюдалось $R_1 < R_{\text{отп}} > 10R_J$ — условие

режима генератора напряжения. Скорость изменения электрического поля ($v_E = dV/dt$) не превышала 1.2 В/с. ВАХ записывалась прибором Н307 (С). Временные характеристики тока и напряжения фиксировались запоминающим осциллографом (О) или другим прибором Н307.

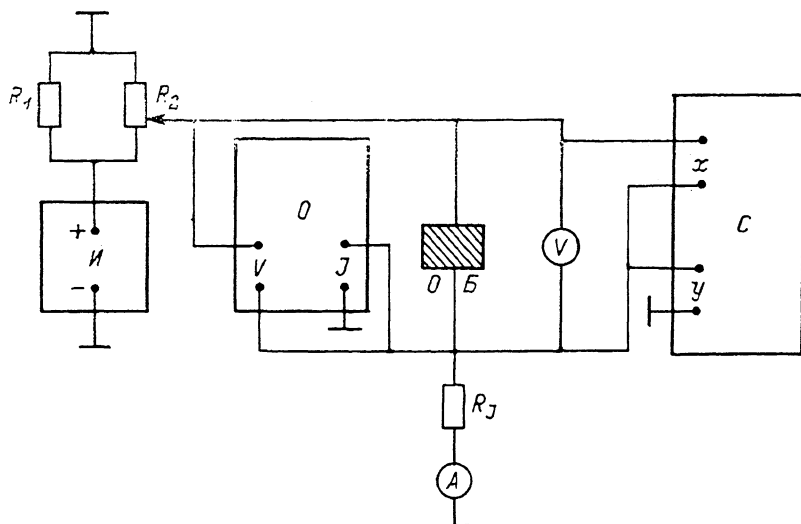


Рис. 1. Схема установки для снятия ВАХ.

На рис. 2 представлены типичные ВАХ (рис. 2, а, б) и временные характеристики тока и напряжения образцов теллура. Особенностью наблюдаемых ВАХ является наличие нескольких участков, отличающихся

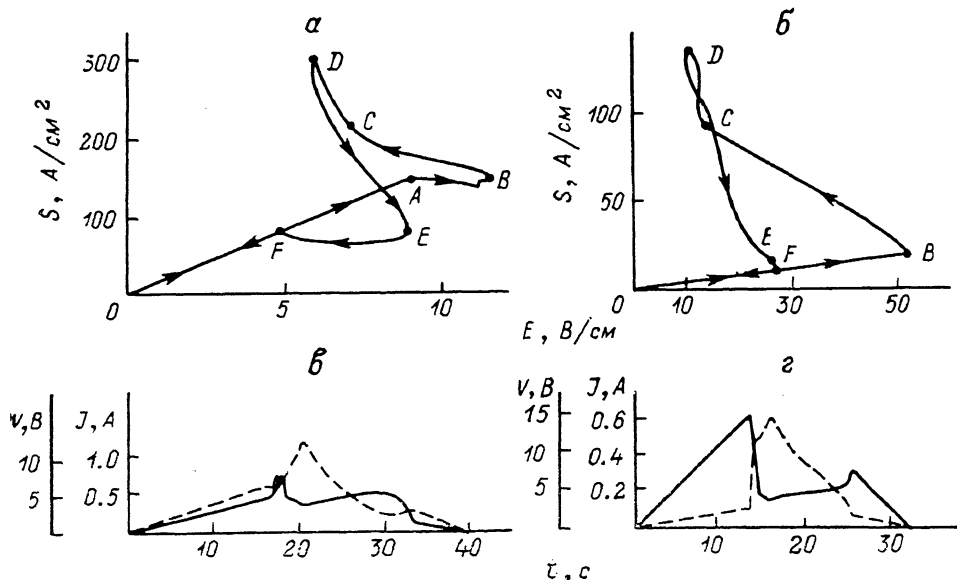


Рис. 2. Типичные ВАХ (а, б) и временные характеристики тока и напряжения (в, г) кристалла теллура.

ющихся закономерностью изменения тока от напряжения: 1) участок линейного изменения тока с ростом напряжения OA ($\sigma_a = dj/dE$, $\Delta j > 0$, $\Delta E > 0$, $d\sigma/dE = 0$); 2) сублинейный участок AB , переходящий в насыщение или даже падающий ($\sigma_a \leq 0$, $\Delta j \leq 0$, $\Delta E > 0$, $d\sigma/dE < 0$); 3) участок BC резкого роста тока и падения напряжения на ВАХ образца ($\sigma_a < 0$, $\Delta j > 0$, $\Delta E < 0$, $d\sigma/dE > 0$); 4) участок CD , где, достигнув определенного значения (точка C), ток в образце растет почти вертикально, в то время как напряжение изменяется незначи-

тельно ($\sigma_d \rightarrow \infty$, $\Delta j > 0$, $\Delta E \approx 0$, $d\sigma/dE \sim \infty$). Состояние образца с большой проводимостью сохраняется до тех пор, пока неизменно внешнее напряжение. Обратный ход ВАХ имеет гистерезис. Ток быстро падает до меньших значений, чем при прямом ходе при одном и том же напряжении (точка E участка DE , $\sigma_d < 0$, $\Delta j < 0$, $\Delta E \approx 0$, $d\sigma/dE < 0$). Затем ток опять насыщается (участок EF , $\sigma_d \geq 0$, $\Delta j < 0$, $\Delta E < 0$, $d\sigma/dE > 0$), но уже при гораздо меньшем электрическом поле, чем поле при первоначальном насыщении (участок AB). Начиная с точки F , изменение тока с напряжением происходит по той же линии, что и в прямом направлении.

Участку OA ВАХ соответствует устойчивое состояние образца, т. е. ток не изменяется при неизменности прямого напряжения на образце. Участку AB ВАХ соответствует неустойчивое состояние образца, т. е. при прекращении увеличения напряжения участок AB тем не менее будет пройден с переходом

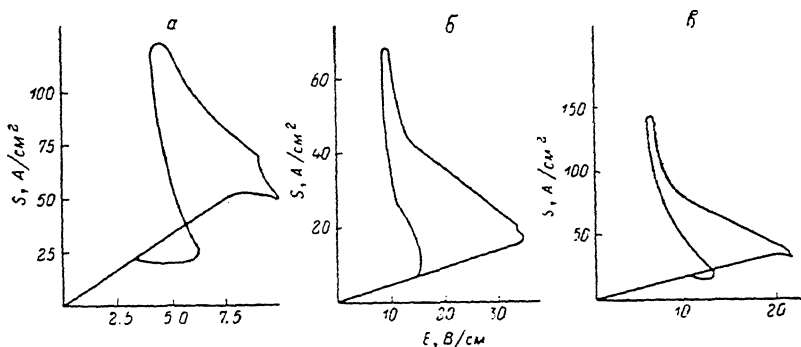


Рис. 3. ВАХ образцов теллура.

L , см: $a - 1$, $b - 0.5$, $v - 0.45$. S , см²: $a - 0.16$, $b - 0.012$, $v - 0.09$. σ_0 , Ом⁻¹·см⁻¹: $a - 0.92$ (образец ЗТП5), $b - 0.64$ (ЗТП1), $v - 1.64$ (ЗТП4).

на участок BC , которому соответствует также неустойчивое состояние образца. Следующим участком CD и DE ВАХ соответствует устойчивое по току и во времени состояние образца. Участок EF отличается неустойчивостью состояния, т. е. характеристика возвращается к участку AB , но уже в точке F , даже при прекращении уменьшения внешнего напряжения на образце.

На рис. 3 представлены ВАХ образцов, отличающихся удельным сопротивлением и размерами.

Следует отметить, что изгиб на вольтамперной характеристике, насыщение и даже отрицательная дифференциальная проводимость (ОДП) наблюдаются в этих же образцах и при гораздо больших импульсных электрических полях ($E > E_k$), определяемых условием $\mu E_k = v_s$.

Ясно, что наблюдаемые нелинейные участки на вольтамперной характеристике монокристаллов теллура при столь малых электрических полях ($E_k \sim \sim 10$ В/см) обусловлены не эффектом акустоэлектронного взаимодействия. Для выяснения механизма наблюдаемых явлений были проведены измерения температурной зависимости электропроводности исследуемых образцов теллура в интервале 77 ÷ 300 К.

На рис. 4 представлены графики температурной зависимости электропроводности образцов, ВАХ которых даны на рис. 3. Видно, что для некоторых из образцов электропроводность падает с ростом температуры (рис. 4, a), для других, наоборот, растет (рис. 4, b), для третьих эта зависимость остается промежуточной (рис. 4, v).

Проведен анализ вида ВАХ теллура в условиях электротемпературного эффекта:

$$I = \frac{S}{L} \sigma V. \quad (1)$$

С ростом напряжения образец заметно нагревается, вследствие чего и температура кристалла T_0 повышается и становится равной [14]

$$T = T_0 + \Delta T = T_0 + \eta I V, \quad (2)$$

где η — тепловая константа образца. Учитывая (2), из (1) для дифференциальной проводимости (ДП) образца находим

$$\frac{dI}{dV} = \frac{I}{V} \frac{1+x}{1-x}, \quad (3)$$

$$x = \frac{S}{L} \eta V^2 \frac{d\sigma}{dT}. \quad (4)$$

Из (1) и (3) следуют различные виды зависимости тока от напряжения. При слабом нагреве, когда подвижность и концентрация носителей остаются постоянными величинами ($d\sigma/dT=0$, $dI/dV=I/V$) ВАХ линейна (рис. 2, 3, участок OA). С ростом напряжения V , приводящего к увеличению нагрева и повышению температуры образца, когда подвижность и концентрация носителей начинают изменяться с температурой, дифференциальная проводимость будет отличаться от I/V в зависимости от температурного хода электропроводности σ конкретного образца. Из рис. 4, *a* видно, что $d\sigma/dT < 0$, и при $-1 < x < 0$ на ВАХ должен появиться сублинейный участок ($x = -1/3$, $dI/dV = I/2V$ — параболическая нелинейность) (рис. 3, *a*). Согласно рис. 4, *б*, $d\sigma/dT > 0$, и исходя из (3) и (4) на ВАХ сублинейный участок отсутствует (рис. 3, *б*), а из рис. 4, *в* следует, что в некоторой области температур (до 175 К) $d\sigma/dT < 0$, а затем претерпевает инверсию знака,

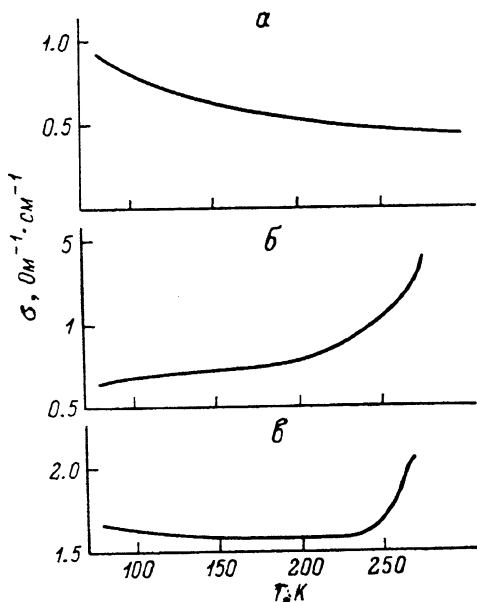


Рис. 4. Температурные зависимости электропроводности образцов теллура.

Образцы: *a* — ЗТП5, *б* — ЗТП1, *в* — ЗТП4.

что обуславливает наличие на ВАХ небольшого сублинейного участка. Если исходить из того, что в (1)

$$\sigma = e(\mu_e n_e + \mu_p n_p), \quad (5)$$

а температурные зависимости подвижности и концентрации носителей имеют вид

$$\mu = AT^{-3/2}, \quad n = n_0 \exp(-E_g/2kT), \quad (6)$$

анализ дифференциальной проводимости

$$\frac{dI}{dV} = \frac{I}{V} \frac{1 + \frac{3}{2} \frac{S}{L} \frac{\Delta T}{T} \left(\frac{\Delta T_e}{\Delta T} \frac{E_g}{3kT} - 1 \right)}{1 - \frac{3}{2} \frac{S}{L} \frac{\Delta T}{T} \left(\frac{\Delta T_e}{\Delta T} \frac{E_g}{3kT} - 1 \right)}, \quad (7)$$

где $\Delta T_e = \eta I_e V$, ($I_e = en_e \mu_e V$), не позволяет сделать вывод о возможности наличия на ВАХ участков насыщения и ОДП, что, однако, на экспериментальных ВАХ наблюдается. Необходимо, по-видимому, учитывать и другие физические явления при протекании электрического тока через кристалл. Одним из установленных и изученных явлений в теллуре является возникающее под действием приложенного электрического поля явление эксклюзии [15], которое и может приводить к появлению участка ОДП на ВАХ в условиях электро-температурного эффекта.

При напряжениях, когда $\kappa > 1$, $dV/dI < 0$, ВАХ имеет участок S -образного, отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), что должно быть и при наличии явления эксклюзии в кристалле [14].

В кристаллах теллура продолжающийся разогрев образца с ростом приложенного электрического поля приводит к интенсивной генерации электронов (образец становится собственным полупроводником), которая на ВАХ проявляется резким скачком ($\kappa > 1$) электропроводности (рис. 2, участок BC ; рис. 3), при этом по мере разогрева образца начинает образовываться проводящий шнур (участок BC неустойчив), после чего образец «зажигается» (точка C на участке CD), т. е. возникает плазменный канал, сечение которого варьируется с изменением приложенного напряжения, ток изменяется в широких пределах (рис. 2, $a, б$, участки CD и DE ; рис. 3) при почти постоянном напряжении на образце, в то время как прикладываемое напряжение меняется.

В состоянии высокой электропроводности образец может находиться в любой точке участка DE и в течение неограниченного времени. Этот участок может быть воспроизведен при прямом и обратном изменениях напряжения.

Характерной особенностью ВАХ образцов теллура с $d\sigma/dT < 0$ является то, что при обратном ходе изменения напряжения ток достигает значительно меньших значений, чем в прямом, при одном и том же напряжении, т. е. высокопроводящий канал сохраняется даже при общем токе ниже омического. В таком случае наряду с высокопроводящим каналом должна существовать высокоомная область. Проводимость образца осуществляется узким каналом.

Итак, монокристаллы теллура в условиях электротемпературного эффекта при некоторых электрических полях переходят в высокопроводящее, т. е. возбужденное состояние, характеризующееся тем, что в образце возникает устойчивый во времени локализованный горячий плазменный шнур, зависимость плотности тока в котором от напряженности электрического поля нелинейна. Как показано в работе [16], связанные, долгоживущие, существенно нелинейной природы локализованные возбуждения общепринято называть давидовскими солитонами. Обнаруженное и наблюдаемое нами возбуждение, с этой точки зрения, является не чем иным, как солитоном. Эти возбуждения (солитоны) играют важную роль в процессах переноса заряда и энергии.

Список литературы

- [1] Ishiguro T., Tanaka T. // Japan. J. Appl. Phys. 1967. V. 6. N 7. P. 864—874.
- [2] Quentin G. These de doctorat d'etel es sciences physiques. Paris. 1967.
- [3] Shiosaki T., Matsumoto H., Chiharo H., Kawabata A. // Japan. J. Appl. Phys. 1973. V. 12. N 3. P. 337—342.
- [4] Kuzmanu H. // Phys. St. Sol. (a). 1974. V. 25. N 9. P. 9—67.
- [5] Жохов В. З., Степуренко А. А., Магомедов М.-Р. А. // Межвуз. сб. «Пробой диэлектриков и полупроводников». В. 2. Махачкала. 1976. С. 168—172.
- [6] Жохов В. З., Степуренко А. А. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 1. С. 203.
- [7] Бондар В. М., Радченко В. С. // ФТТ. 1980. Т. 14. В. 11. С. 2096—2102.
- [8] Hoerstel W., Link R., Neubert R. // Phys. St. Sol. A. 1973. V. 19. N 2. P. 451—458.
- [9] Balynas V., Dobrovolskis Z., Hoerstel W., Krotkus A. // Phys. St. Sol. (a). 1980. V. 62. P. K9.
- [10] Бондар В. М., Радченко В. С., Томчук П. М. // Препринт ИФ АН УССР. Киев, 1981. № 5.
- [11] Радченко В. С. // Автореф. канд. дис. Киев, 1981.
- [12] Nebauer E., Jahne E. // Phys. St. Sol. 1965. V. 8. P. 881—896.
- [13] Сондаевский В. Л., Стафеев В. И. // Физика p - n -переходов. Л., 1966. С. 83—88.
- [14] Аронов Д. А. // Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. 1980. № 6. С. 55—89.
- [15] Воробьев Л. Е., Галецкая А. Д., Манчинский А. М., Фарбштейн И. И., Шалыгин В. А., Штурбин А. В. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 11. С. 2128—2133.
- [16] Кашеев В. Н. // Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и тех. наук. 1988. № 6. С. 16—23.