

05.2;07.2

Особенности отклика электронной системы природного пирита на электрическое поле

© Н.П. Степанов, Г.И. Грабко

Забайкальский государственный университет, Чита, Россия
E-mail: np-stepanov@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 24 декабря 2023 г.

Принято к публикации 13 февраля 2024 г.

Представлены результаты исследования отклика природного пирита электронного и дырочного типа проводимости на одиночные импульсы электрического напряжения амплитудой 50–300 В. Установлено, что сопротивление образцов уменьшается при увеличении амплитуды напряжения. Обнаружена зависимость сопротивления исследуемых материалов от полярности импульса. Полученные данные согласуются с результатами предыдущих исследований, свидетельствующих о наличии собственного внутреннего поля в природном пирите, обусловленного неравномерным распределением примеси в его объеме.

Ключевые слова: пирит, импульсное электрическое поле, удельное сопротивление, неравномерное распределение примеси, диффузионный ток, дрейфовый ток.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.10.57705.19745

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к изучению природных полупроводниковых соединений с целью их применения в различных электронных устройствах [1–4]. Одним из направлений исследований является изучение возможности использования природных минералов в качестве термоэлектрических преобразователей энергии. Последнее во многом обусловлено желанием вовлечь в сферу термоэлектрического материаловедения относительно дешевые материалы, широко распространенные в природе. Полупроводниковыми соединениями, на основе которых могут быть изготовлены экономичные преобразователи тепловой энергии в электрическую, являются сульфиды, представляющие собой бинарные соединения серы с различными металлами. Они демонстрируют довольно высокие значения коэффициента термоэдс [5,6], однако требуется поиск путей уменьшения их удельного сопротивления. Самым распространенным представителем семейства сульфидов является пирит FeS_2 . Как показывают результаты предыдущих исследований [6,7], в зависимости от места локализации месторождения пирит характеризуется либо n -, либо p -типом проводимости, что обусловлено различием в его составе примесей. При этом встречаются образцы пирита, ионизация примесей в которых в области температур, предшествующих наступлению собственной проводимости, обуславливает быстрый рост удельной электропроводности [8], что благоприятно сказывается на термоэлектрической эффективности материала. Однако в области низких температур требуется определенное воздействие, способное уменьшить электрическое сопротивление образцов. Это диктует необходимость всестороннего исследования физических свойств природного пирита, в частности процессов, происходя-

щих под воздействием электрического поля, способного ионизировать примесные атомы.

В связи с изложенным выше цель настоящей работы состоит в изучении поляризационно-релаксационных явлений в образцах природного пирита FeS_2 и в установлении закономерностей изменения удельного электрического сопротивления в зависимости от величины и полярности одиночных импульсов постоянного напряжения, прикладываемых к образцам с различным типом проводимости.

В процессе исследования изучен отклик двенадцати образцов природного пирита как p -, так и n -типа проводимости на внешнее электрическое поле. Для этого на образец, закрепленный в измерительной ячейке, подавался импульс электрического напряжения, после отключения которого контакты с образца замыкались на аппаратуру, фиксирующую электрическое сопротивление. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Измерительная ячейка 1 обеспечивала возможность контроля и изменения температуры образца 2, который крепился между пружинным, прижимным контактом 3 и стационарным контактом 4. Через ключ 5 на образец подавался импульс постоянного напряжения от источника 6. Значения электрического сопротивления образца фиксировались после окончания действия электрического импульса с помощью комплекса приборов 7, включающего в себя стабилизированный источник тока и милливольтметр.

Длительность импульсов составляла $\Delta t_{imp} \approx 10$ с, что обеспечивало минимизацию эффекта разогрева образца проходящим током. Величина амплитуды подаваемого на образец напряжения варьировалась в пределах $U = 50–300$ В. Было установлено, что в течение 1 мин после завершения электрического импульса сопротив-

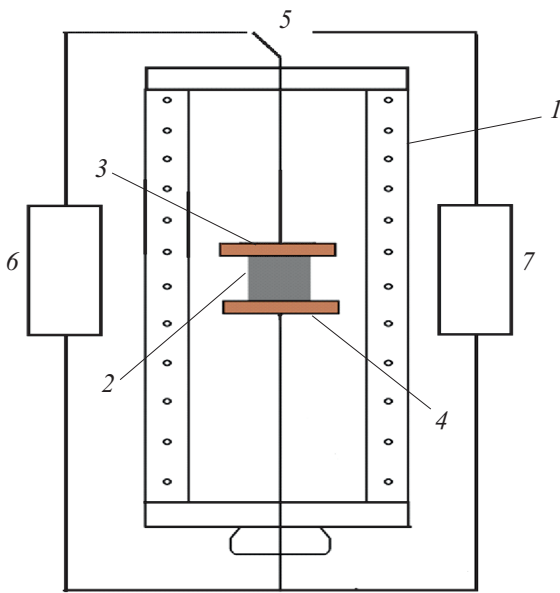


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки. 1 — измерительная ячейка, 2 — исследуемый образец, 3 — прижимной контакт, 4 — стационарный контакт, 5 — ключ, 6 — источник постоянного напряжения, 7 — комплекс приборов для определения сопротивления постоянному электрическому току.

ление образца продолжает уменьшаться до величины ρ_{min} , после чего увеличивается до исходного значения в течение нескольких часов. В связи с этим повторный эксперимент (с большим напряжением) проводился после полной релаксации образца.

Результаты исследования для двух образцов (образцы № 3 и 7, имевшие соответственно наименьшее и наибольшее исходное удельное сопротивление) представлены на рис. 2. Полученные данные свидетельствуют о том, что при увеличении величины напряжения прикладываемого импульса наблюдается уменьшение значения ρ_{min} .

Это может быть обусловлено активацией электрическим полем все большего количества атомов примеси, а также указывает на существование размытого энергетического спектра примесных состояний в исследованных образцах пирита, наличие которых фиксировалось и в работе [8], посвященной изучению температурных зависимостей удельного электрического сопротивления FeS_2 . Таким образом, наиболее вероятно, что в описываемом эксперименте роль фактора внешнего воздействия, вызывающего процесс активации носителей заряда, вместо температуры выполняет импульс напряжения, подаваемого на образец. Импульс напряжения приводит к активации носителей заряда с примесных центров, ловушек, вследствие чего уменьшается величина удельного сопротивления при данной температуре. С практической точки зрения эффект уменьшения сопротивления образца импульсом электрического напряжения интересен тем, что позволяет увеличить электропроводность материала,

способствуя тем самым увеличению его термоэлектрической эффективности.

Помимо этого экспериментальные данные, представленные на рис. 2, могут являться еще одним аргументом, подтверждающим наличие собственного внутреннего поля в образцах природного пирита, для которых характерен существенный разброс в величине коэффициента термоэдс в зависимости от точки локации зонда. Наиболее вероятно, что это обусловлено неравномерным распределением примеси в объеме образца, которое обуславливает диффузию свободных носителей заряда и, как следствие, возникновение электрического поля, останавливающего диффузию. Закономерности изменения величины внутреннего поля в образцах природного пирита в зависимости от температуры были исследованы в работе [8]. Наличие внутреннего поля просматривается и в экспериментальных результатах, полученных в ходе выполнения настоящей работы. Как следует из рис. 2, наблюдается зависимость величины удельного сопротивления от полярности импульса, подаваемого на образец. За отрицательную полярность принималась та, при которой фиксируется большее значение уменьшения удельного сопротивления. Это наиболее вероятно обусловлено совпадением или несовпадением направлений внешнего и внутреннего поля. Как показано в работе [8], последнее сложным образом изменяется в зависимости от температуры, что является следствием температурной зависимости физических величин, входящих в выражение, описывающее баланс диффузионного и дрейфового тока:

$$eD_p \text{grad} p = p\mu E, \tag{1}$$

где e — заряд электрона, D_p — коэффициент диффузии дырок, p и μ — концентрация и подвижность дырок соответственно, E — величина напряженности внутреннего электрического поля. В соответствии с уравнением

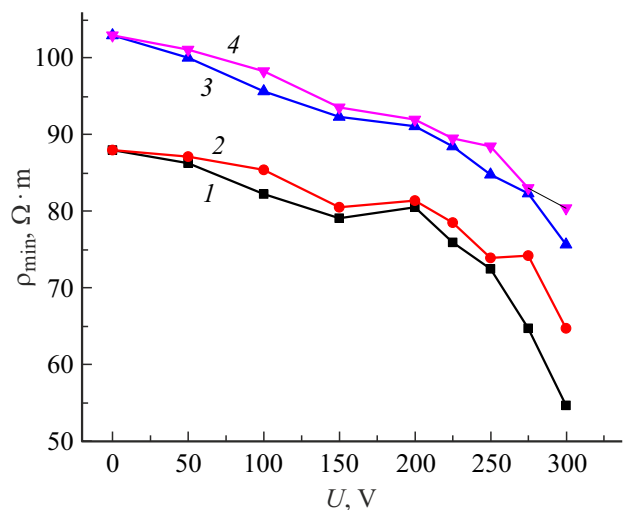


Рис. 2. Зависимость $\rho_{min}(U)$. 1, 2 — образец № 3; 3, 4 — образец № 7. 1, 3 — отрицательная полярность; 2, 4 — положительная полярность.

Эйнштейна, учитывающим связь коэффициента диффузии с подвижностью носителей заряда, можно получить выражение для величины U

$$U = Ex = kT \text{grad} p x / p e, \quad (2)$$

где x — расстояние между зондами, T — температура, k — постоянная Больцмана.

Это напряжение может либо совпадать, либо не совпадать по направлению с внешним. В первом случае оно будет усиливать эффект уменьшения сопротивления, а во втором (противоположном) — ослаблять, что и наблюдается в эксперименте.

В заключение отметим, что эффекты зависимости удельного сопротивления от величины и полярности прикладываемого к образцу напряжения можно использовать для увеличения термоэлектрической эффективности природного пирита.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-20055 (<https://rscf.ru/project/22-22-20055/>) при финансовой поддержке со стороны Правительства Забайкальского края.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H. Chen, A. Maxwell, C. Li, S. Teale, B. Chen, T. Zhu, E. Ugur, G. Harrison, L. Grater, J. Wang, Z. Wang, L. Zeng, S.M. Park, L. Chen, P. Serles, R.A. Awni, B. Subedi, X. Zheng, C. Xiao, N.J. Podraza, T. Filleter, C. Liu, Y. Yang, J.M. Luther, S. De Wolf, M.G. Kanatzidis, Y. Yan, E.H. Sargent, *Nature*, **15** (11), 117 (2022). DOI: 10.1038/s41586-022-05541-z
- [2] J. Yang, A. Banerjee, K. Lord, S. Guha, in *Proc. of the 2nd World Conf. and Exhibition on photovoltaic solar energy conversion* (Vienna, Austria, 1998), vol. I, p. 387–390.
- [3] В.В. Каминский, С.М. Соловьёв, Н.М. Судак, М.И. Залдастаншвили, *Письма в ЖТФ*, **46** (1), 52 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.01.48866.17834 [V.V. Kaminskii, S.M. Solov'ev, N.M. Sudak, M.I. Zaldastanishvili, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (1), 47 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020010071].
- [4] Ю.В. Улашкевич, В.В. Каминский, М.В. Романова, Н.В. Шаренкова, *ФТП*, **52** (2), 184 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.02.45441.8656 [Yu.V. Ulashkevich, V.V. Kaminskiy, M.V. Romanova, N.V. Sharenkova, *Semiconductors*, **52** (2), 172 (2018). DOI: 10.1134/S1063782618020227].
- [5] А.И. Гинзбург, *Методы минералогических исследований* (Недра, М., 1985).
- [6] Н.П. Степанов, С.А. Немов, И.В. Свешников, Г.И. Грабко, А.Н. Власов, А.В. Лесков, А.А. Калашников, Л.Э. Степанова, *ФТП*, **55** (9), 826 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.09.51303.9667
- [7] Р.Г. Шуй, *Полупроводниковые рудные материалы* (Недра, Л., 1979).
- [8] Н.П. Степанов, Г.И. Грабко, *Письма в ЖТФ*, **48** (23), 26 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.23.53948.19347 [N.P. Stepanov, G.I. Grabko, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (12), 22 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.12.54940.19347].