

УДК 537.226.1, 537.311
DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-9-25-32

ПРИРОДНЫЙ ПИРИТ N- И P-ТИПА ПРОВОДИМОСТИ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПРИРОДНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

NATURAL PYRITE OF N- AND P-TYPE CONDUCTIVITY AS A PROMISING NATURAL MATERIAL FOR THE CREATION OF CONVERTERS OF THERMAL ENERGY INTO ELECTRICAL

Н. П. Степанов,
Забайкальский
государственный
университет,
г. Чита
np-stepanov@mail.ru

N. Stepanov,
Transbaikal State University,
Chita



Г. И. Грабко,
Забайкальский
государственный
университет,
г. Чита
gigrabko@gmail.com

G. Grabko,
Transbaikal State University,
Chita



Ведется поиск полупроводников, позволяющих обеспечить термоэлектрическую эффективность. Наблюдается повышенный интерес к изучению термоэлектрических (термоЭДС) свойств природного пирита. *Объектом исследования* является природный пирит n- и p-типа проводимости. *Предметом исследования* являются термоэлектрические свойства пирита. *Цель исследования* – выявить закономерности изменения электрофизических свойств природного пирита в зависимости от температуры. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: собрать установку для снятия температурных зависимостей напряжения $U(T)$ и удельного сопротивления $\rho(T)$ природного пирита в диапазоне 300...600 К; выявить температурные зависимости напряжения $U(T)$, фиксирующегося между двумя различными точками на поверхности образцов природного пирита в диапазоне от 300...600 К; определить температурные зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ образцов природного пирита в диапазоне 300...600 К; проанализировать полученные результаты с точки зрения теоретических представлений о процессах переноса электрического заряда и тепла в полупроводниковых материалах; дать оценку перспективности практического использования природного пирита в термоэлектрическом материаловедении. Представлены результаты исследования термоэлектрических свойств природного пирита FeS_2 n- и p-типа проводимости, а также природного пирита с кварцевыми включениями. Проведение данного исследования обусловлено необходимостью поиска и изучения новых составов, на основе которых могут изготавливаться экономичные и относительно дешевые термоэлектрические материалы. Экспериментальным путем получены температурные зависимости удельного сопротивления и напряжения, зафиксированного между двумя точками на поверхности образцов. Для этого образцы, закрепленные между двух контактов в измерительной ячейке, выдерживающей нагревание до температуры 600 К, помещались в муфельную печь ПМ-8. Большая масса керамики и малая скорость увеличения температуры муфельной печи обеспечили равномерное нагревание исследуемых образцов пирита. Для повышения равномерности нагрева как объемных, так и поверхностных слоев экспериментальных образцов использован специальный металлический куб, который дополнительно выполнял роль электростатического экрана. Последнее актуально с точки зрения повышения качества проводимых измерений. В ходе исследования выявлено, что у образцов с кварцевыми включениями с ростом температуры быстрее растет напряжение, чем у образцов дырочного и электронного пирита. Установлено, что максимальные значения напряжения, фиксирующегося между двумя точками на поверхности образцов, составляют $2,5 \times 10^4$ мкВ для пирита с кварцевыми включениями, $1,4 \times 10^4$ мкВ – для дырочного пирита и не превышают 7×10^3 мкВ для электронного пирита. Максимальные значения удельного сопротивления составили $15 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для дырочного пирита, $432,75 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – для электронного пирита и $1 \text{ КОм} \cdot \text{м}$ – для пирита с кварцевыми включениями. На основании полученных данных сделан вывод о том, что дырочный пирит с практической точки зрения является наиболее перспективным материалом для использования в термоэлектрическом материаловедении. Обсуждаются физические механизмы наблюдаемых эффектов

Ключевые слова: природный пирит, неоднородности, внутреннее электрическое поле, температурные зависимости, напряжение, удельное сопротивление, термоэлектрические материалы, образцы, муфельная печь, кварцевые включения

The search for semiconductors that allowed to provide thermoelectric efficiency is under way. There is an increased interest in the study of thermoelectric (thermoelectric EMF) properties of natural pyrite. *The object of the study* is natural pyrite of n- and p-type conductivity. Thermoelectric properties of pyrite are *the subject of the study*. *The purpose of the study* is to reveal regularities of changes in the thermoelectric properties of natural pyrite depending on temperature. To reach this purpose the following problems should be solved: to collect the equipment for temperature dependences of voltage $U(T)$ and resistivity $\rho(T)$ of natural pyrite in the range 300...600 K; to determine temperature dependences of voltage $U(T)$, fixed between two different points on the surface of natural pyrite samples in the range 300...600 K; to determine temperature dependences of resistivity $\rho(T)$ of natural pyrite samples in the range 300...600 K; to analyze obtained results in terms of theoretical and applied research. The results of the study of thermoelectric properties of natural pyrite FeS_2 n- and p-type conductivity, as well as natural pyrite with quartz inclusions are presented. This study is due to the need to search for and study new compositions, on the basis of which economical, cheap thermo generators can be manufactured. Experimentally, temperature dependencies of resistivity and voltage fixed between two points on the surface of the samples were obtained. For this purpose, samples fixed between two contacts in a specially prepared cell were placed in a muffle furnace that ensures uniform heating. For improving uniform heating as inside as surface layers of the experimental samples the special metal cube, which has function of the electrostatic protector in addition, has been used. It is special actually from a point of view raising quality of the measuring. Samples with quartz inclusions have been found to exhibit steeper voltage rises with increasing temperature than samples of hole and electron pyrite. It has been proved that the maximum values of the voltage recorded between two points on the surface of the samples are $2.5 \times 10^4 \mu V$ for pyrite with quartz inclusions, $1.4 \times 10^4 \mu V$ for hole pyrite and do not exceed $7 \times 10^3 \mu V$ for electron pyrite. The maximum resistivity values are $15 \Omega \cdot m$ for hole pyrite, $432.75 \Omega \cdot m$ for electron pyrite and $1 \text{ k}\Omega \cdot m$ for pyrite with quartz inclusions. Based on the data obtained, the authors conclude that hole pyrite from a practical point of view is the most promising material for using in thermoelectric materials science. The physical mechanisms of the observed effects are discussed

Key words: natural pyrite, heterogeneities, internal electric field, temperature dependences, voltage, resistivity, thermoelectric materials, samples, muffle furnace, quartz inclusions

Введение. Постоянно расширяющаяся область применения электроники в различных сферах деятельности человека предопределяет вовлечение в использование разнообразных природных и специально синтезированных в лабораторных условиях полупроводниковых материалов. В связи с этим, ведется поиск полупроводников, обладающих заданными характеристиками, удовлетворяющими тем или иным требованиям. Одним из направлений поиска полупроводниковых материалов является термоэлектрическое материаловедение, в настоящее время остро нуждающееся в относительно дешевых компонентах, которые можно было бы использовать для создания

термоэлементов. Они должны обладать большей, чем у металлов, величиной коэффициента термоЭДС, высокой электропроводностью и низкой теплопроводностью, что в соответствии с критерием А. Ф. Иоффе, позволило бы обеспечить им приемлемое значение термоэлектрической эффективности. Наблюдается повышенный интерес к изучению термоэлектрических свойств различных материалов [1; 7; 8; 9; 12] и, в частности, природных полупроводниковых соединений¹.

Актуальность исследования. Известно, что термоэлектрические элементы, используемые для создания полупроводниковых приборов генерации электрического тока,

¹ Степанов Н. П. Температурная зависимость физических свойств пирита, влияющая на его термоэлектрическую эффективность // Кулагинские чтения: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. ЗабГУ. – Чита. 2019. – С. 183–188; Степанов Н. П., Немов С. А., Свешников И. В., Грабко Г. И., Власов А. Н., Лесков А. В., Калашников А. А., Степанова Л. Э. Температурные зависимости коэффициента термоэдс, удельного сопротивления и теплопроводности электронного и дырочного пирита FeS_2 в интервале 293–400 К // Физика и техника полупроводников. – 2021. – Т. 55, вып. 9. – С. 826–831.

должны сочетать надежность, компактность, экономичность и эффективность. Есть основания предполагать, что одними из перспективных составов, удовлетворяющих обозначенным запросам, могут являться сульфиды и, в частности пирит FeS_2 ². Данные минералы широко распространены в природе, входят в состав большинства массивных гидротермальных рудных тел, встречаются в гидротермальных жилах и метасоматических формациях любой температуры образования. Они являются объектом добычи в промышленных масштабах³. Последнее обусловлено тем, что сульфиды, среди которых преобладают бинарные соединения серы с железом, никелем, медью, кобальтом, свинцом и др. (CoS_2 , NiS_2 , $(\text{Fe}, \text{Cu})\text{S}_2$, RuS_2 , $(\text{Ni}, \text{Si})\text{S}_2$ и др.) – это одна из важнейших групп рудных минералов, содержащих большую часть мировых запасов цветных металлов.

Объект исследования – природный пирит n - и p -типа проводимости.

В свою очередь, пирит FeS_2 является самым распространенным среди данных материалов, свойства которого достаточно подробно изучены⁴. Так, согласно результатам предыдущих исследований, установлено, что FeS_2 относится к полупроводникам. При этом в природе, в частности на месторождениях Забайкальского края, встречаются образцы природного пирита как n -, так и p -типа проводимости⁵. Его термоЭДС $a_{\text{ТЕРМО}}$ значительно повышается в области высоких температур. С другой стороны, та же $a_{\text{ТЕРМО}}$ имеет зависимость обратно пропорциональную от концентрации свободных носителей заряда (n)⁶. Последний параметр может значительно варьироваться как по знаку, так и по величине для различных образцов пирита. Этот эффект, вероятнее всего, обусловлен наличием в образцах пирита FeS_2 как донорной, так и акцепторной примесей одновременно. Таким образом, распространенность пирита в природе, а также варьирование в широких

пределах его физических и, в частности, термоэлектрических свойств, позволяют рассматривать данное химическое соединение как перспективный материал для создания на его основе дешевых преобразователей тепловой энергии в электрическую.

Цель исследования – выявить закономерности изменения электрофизических свойств природного пирита в зависимости от температуры.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1) собрать установку для снятия температурных зависимостей напряжения $U(T)$ и удельного сопротивления $\rho(T)$ природного пирита в диапазоне 300...600 К;

2) выявить температурные зависимости напряжения $U(T)$, фиксирующегося между двумя различными точками на поверхности образцов природного пирита в диапазоне 300...600 К;

3) определить температурные зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ образцов природного пирита в диапазоне 300...600 К;

4) проанализировать полученные результаты с точки зрения теоретических представлений о процессах переноса электрического заряда и тепла в полупроводниковых материалах;

5) дать оценку перспективности практического использования природного пирита в термоэлектрическом материаловедении.

Образцы, методика и техника эксперимента. На рис. 1 представлены образцы природного пирита n -типа проводимости, которая определялась по знаку коэффициента термоЭДС $a_{\text{ТЕРМО}}$ методом горячего зонда. При этом наблюдалось варьирование величины $a_{\text{ТЕРМО}}$ в зависимости от точки приложения на поверхности образцов. В таблице приведены средние значения этого параметра, определявшиеся при комнатной температуре.

² Степанов Н. П. Температурная зависимость физических свойств пирита, влияющая на его термоэлектрическую эффективность // Кулагинские чтения: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. ЗабГУ. – Чита, 2019. – С. 183–188; Степанов Н. П., Немов С. А., Свешников И. В., Грабко Г. И., Власов А. Н., Лесков А. В., Калашников А. А., Степанова Л. Э. Температурные зависимости коэффициента термоЭДС, удельного сопротивления и теплопроводности электронного и дырочного пирита FeS_2 в интервале 293–400 К // Физика и техника полупроводников. – 2021. – Т. 55, вып. 9. – С. 826–831.

³ Там же.

⁴ Там же.

⁵ Там же.

⁶ Там же.



Рис. 1. Исследуемые образцы пирита / Fig. 1. Pyrite samples under study

Физические параметры образцов пирита *n*-типа проводимости /
Physical parameters of *n*-type conductivity pyrite samples

Образец / Sample	$\alpha_{\text{ТЕРМО}}$, мкВ/К	U , мкВ	R , кОм	ρ , Ом·м
1	120	200	19,23	432,75
2	140	130	4,43	99,75
3	143	430	11,13	250,5
4	190	300	13,7	308,25
5	103	260	4,6	103,5

Как следует из данных, приведенных в таблице, диапазон изменения термоЭДС электронного пирита составил 103...190 мкВ/К. Для дырочного пирита максимальные значения данного параметра составили $\alpha_{\text{ТЕРМО}} = 350$ мкВ/К. Удельное сопротивление образцов FeS_{2n} -типа варьировалось от 99,75 до 432,75 Ом·м, в отличие от пирита *p*-типа проводимости, для которого $\rho = 15$ Ом·м, и пирита с включениями кварца – $\rho = 1$ кОм·м.

В результате предварительного исследования обнаружено наличие собственного внутреннего поля в образцах *n*- и *p*-типа, которое является следствием неравномерного распределения примеси по объему образца. Подобный эффект ранее обнаружен в других материалах, в частности в сульфиде самария [2-5;10; 11; 13] и телуриде свинца [6]. В таблице приведены средние значения этого параметра, определявшиеся при комнатной температуре. Принципиальная схема экспериментальной установки, использовавшейся для проведения температурных измерений, приведена на рис. 2.

В ходе эксперимента измерялись температурные зависимости напряжения $U(T)$, фиксирующегося между двумя точками на поверхности образцов, и удельного сопротивления $\rho(T)$. Для чего образцы, закрепленные между двух контактов в специально приготовленной

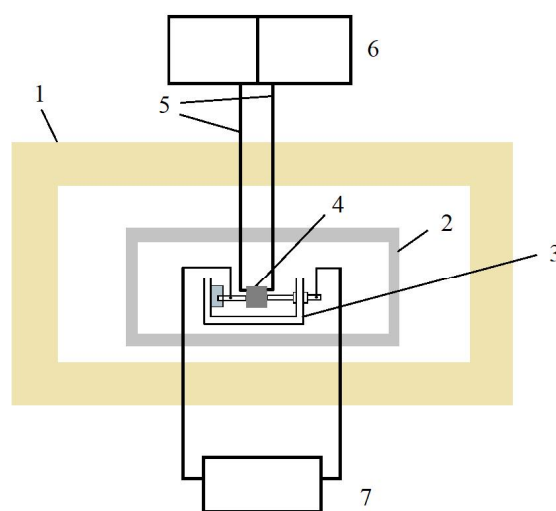


Рис. 2. Установка для исследования электрофизических характеристик образцов пирита: муфельная печь ПМ 8 – 1; контейнер – 2; измерительная ячейка – 3, исследуемый образец – 4, термопары – 5, мультиметры DT 9205A – 6, милливольтметр двухканальный АКТАКОМ АМВ 1084 – 7 / Fig. 2. Installation for electrophysical characteristics studying of pyrite samples. Muffle furnace PM 8 – 1; container – 2; measuring cell – 3, sample under study – 4, thermocouples – 5, multimeters DT 9205A – 6, millivoltmeter two-channel AKTACOM AMV 1084 – 7

ячейке, помещались в муфельную печь, обеспечивающую равномерное нагревание всей установки и, в частности самих образцов. Температура определялась с помощью термодпар, закрепленных на образце. Интервал температур составил 300...600 К. Для фиксации величин напряжения и сопротивления использовался цифровой милливольтметр. При этом измерения зависимостей $U(T)$ и $\rho(T)$ осуществлялось в разных режимах, характеризующихся различной скоростью нагревания образцов:

$$v_1 = \Delta T_1 / \Delta t, \quad v_2 = \Delta T_2 / \Delta t, \quad v_3 = \Delta T_3 / \Delta t,$$

$$\text{где } \Delta T_1 = T_{\max} - T_{\min} \approx 175 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta T_2 \approx 250 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta T_3 / \approx 315 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta t \approx 10 \text{ мин.}$$

Результаты исследования и их обсуждение. Температурная зависимость удельного сопротивления $\rho(T)$ образца природного пирита, приведенная на рис. 3, свидетельствует о полупроводниковой природе исследуемого вещества. Практически все кривые $U(T)$, снятые в режиме нагрев-остывание (рис. 4, кривая 1, кривая 2 соответственно), имели «петлеобразную» форму. При этом экспериментальные данные демонстрировали хорошую повторяемость результатов.

Максимальные значения величины напряжения зафиксированы для образцов пирита с кварцевыми включениями в режиме нагревания и составили $U \approx 2,5 \times 10^4$ мкВ при температуре $T \approx 250$ °С (рис. 5). Наименьшая величина напряжения зафиксирована для электронных образцов. Значение этого параметра для FeS_2

n -типа не превышало $U \leq 7 \times 10^3$ мкВ; для дырочного пирита – $U \leq 1,4 \times 10^4$ мкВ.

При этом, в отличие от пирита с кварцевыми включениями, кривые $U(T)$ которого демонстрировали достаточно резкое возрастание при нагревании, при определенной температуре (рис. 5), те же зависимости образцов дырочного и электронного FeS_2 характеризовались более плавным ходом (см. рис. 4). Вероятнее всего, это связано с реакцией полей, обусловленных контактной разностью потенциалов на границах между основной матрицей исследуемого материала и включениями из кварца, на температурное воздействие. При-

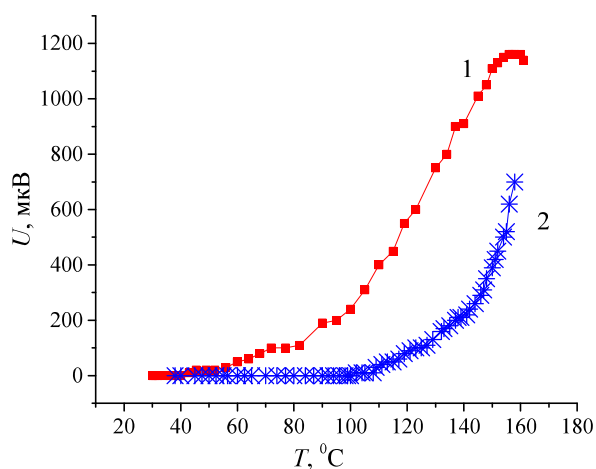


Рис. 4. Температурная зависимость напряжения дырочного пирита: 1 – нагрев; 2 – остывание с кварцевыми включениями / Fig. 4. Temperature dependence of the hole pyrite voltage: 1 – heating; 2 – cooling with quartz inclusions

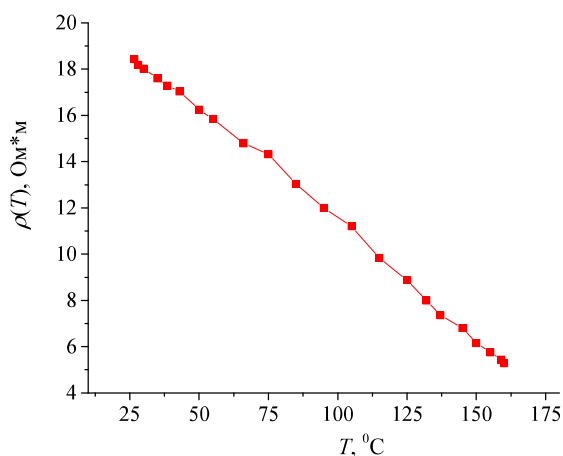


Рис. 3. Температурная зависимость удельного сопротивления дырочного пирита / Fig. 3. Temperature dependence of the hole pyrite resistivity

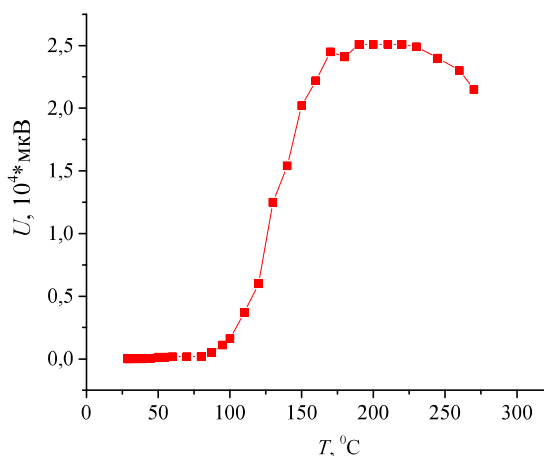


Рис. 5. Температурная зависимость напряжения пирита с кварцевыми включениями / Fig. 5. Temperature dependence of the pyrite voltage with quartz inclusions

рода собственных полей пирита n - и p -типа проводимости может быть обусловлена разностью концентраций донорной или акцепторной примесей в объемных слоях соответствующих образцов.

Выводы. В ходе экспериментов по изучению влияния температуры на собственные внутренние поля образцов природного пирита как n - и p -типа проводимости, так и FeS_2 с кварцевыми включениями установлено, что зависимости $U(T)$ (см. рис. 4, рис. 5) в режиме нагрев-остывание имеют «петлеобразную» форму с более крутыми участками роста и спада для последнего состава. Данный эффект может быть связан с наличием контактной разности потенциалов на границах между основной матрицей исследуемого материала и включениями из кварца. Оценка значений максимальных величин напряжений собственных

внутренних полей и удельных сопротивлений исследуемых материалов позволяет сделать предположение о том, что наиболее перспективным составом с точки зрения наилучшего сочетания данных параметров является дырочный пирит. Для него значения характеристик, отражающих термоэлектрическую эффективность, составили соответственно $U \leq 1.4 \times 10^4$ мкВ, $\rho \approx 15$ Ом·м. Следовательно, FeS_2 p -типа обладает наибольшей удельной проводимостью, которая на порядки превышает аналогичный параметр образцов n -типа. Таким образом, полученные в ходе исследования результаты указывают на необходимость поиска путей улучшения термоэлектрических характеристик образцов n -типа, что необходимо для создания термоэлементов на основе природного пирита.

Список литературы

1. Гуриева Е. А., Прокофьев Л. В., Равич Ю. И., Электронномикроскопические и рентгенофазовые исследования монокристаллов висмута, легированного Te и Se // Перспективные материалы: доклады VII Межгосударственного семинара. 2006. № 3. С. 180–183.
2. Егоров В. М., Каминский В. В., Казанин М. М., Соловьев С. М., Голубков А. В. КПД преобразования тепловой энергии в электрическую за счёт термо voltaического эффекта // Письма в журнал технической физики. 2015. Т. 41, № 8. С. 50–54.
3. Казанин М. М., Каминский В. В., Соловьев С. М. Аномальная термоэдс в моносulfиде самария // Журнал технической физики. 2000. Т. 70, № 5. С. 136–138.
4. Каминский В. В., Молодых А. М., Полухин И. С., Соловьев С. М., Шуваев К. В. Термовольтаический эффект в sms при деформации, создаваемой сферическим индентором // Письма в журнал технической физики. 2014. Т. 40, № 6. С. 150–152.
5. Каминский В. В., Соловьев С. М. Возникновение электродвижущей силы при изменении валентности ионов самария в процессе фазового перехода в монокристаллах sms // Физика твердого тела. 2001. Т. 43, № 3. С. 423–426.
6. Каминский В. В., Соловьев С. М., Судак Н. М., Залданшанишвили М. И. Обнаружение термовольтаического эффекта в гетероструктуре на основе теллурида свинца // Письма в журнал технической физики. 2020. Т. 46, № 1. С. 52–54.
7. Лукьянов Л. Н., Кутасов В. А., Константинов П. П. Твёрдые растворы n -(Bi, Sb) $_2$ (Te, Se, S) $_3$ для интервала температур 250–350 К // Перспективные материалы: доклады VII Межгосударственного семинара. 2006. № 3. С. 52–56.
8. Палажченко В. И., Крниенко А. В. Оптимизация состава твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ для p -ветви термогенератора // Перспективные материалы: доклады VII Межгосударственного семинара. 2006. № 3. С. 153–155.
9. Редько Р. А., Родионов Н. А., Польшин В. И., Зотова О. В. Влияние легирования сплавов висмут-сурьма на термоэлектрическую добротность // Перспективные материалы: доклады VII Межгосударственного семинара. 2006. № 3. С. 100–102.
10. Улашкевич Ю. В., Каминский В. В., Романова М. В., Шаренкова Н. В. Исследование длинноволновых инфракрасных спектров отражения моно- и поликристаллов sms в области гомогенности // Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52, № 2. С. 184–188.
11. Улашкевич Ю. В., Каминский В. В., Соловьев С. М., Шаренкова Н. В. Спектры пленок sms в дальней и средней ИК областях // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53, № 11. С. 1544–1546.
12. Шелимова Л. Е., Константинов П. П., Карпинский О. Г., Кретова М. А., Земсков В. С., Авилов Е. С. Кристаллическая структура и термоэлектрические свойства халькогенидов $\text{GeTe mBi}_2\text{Te}_3$ // Перспективные материалы: доклады VII Межгосударственного семинара. 2006. № 3. С. 34–36.
13. Kaminskii V. V., Kazanin M. M., Klishev A. N., Solov'ev S. M., Golubkov A. V. Thermovoltaic effect in samarium sulfide-based heterostructures // Technical Physics. 2011. Vol. 81, no. 6. P. 150–152.

References

1. Gurieva E. A., Prokofiev L. V., Ravich Yu. I. *Perspektivnye materialy* (Promising materials), 2006, no. 3, pp. 180–183.
2. Egorov V. M., Kaminsky V. V., Kazanin M. M., Soloviev S.M., Golubkov A.V. *Pisma v zhurnal tehnicheckoy fiziki* (Letters to the Journal of Technical Physics), 2015, vol. 41, no. 8, pp. 50–54.
3. Egorov V. M., Kaminsky V. V., Kazanin M. M., Soloviev S.M., Golubkov A.V. KPD preobrazovaniya 3. Kazanin M.M., Kaminsky V.V., Soloviev S.M. *Zhurnal tehnicheckoy fiziki* (Letters to the Journal of Technical Physics), 2000, vol. 70, no. 5, pp. 136–138.
4. Kaminsky V. V., Molodykh A. M., Polukhin I. S., Soloviev S.M., Shuvaev K.V. *Pisma v zhurnal tehnicheckoy fiziki* (Letters to the Journal of Technical Physics), 2014, vol. 40, no. 6, pp. 150–152.
5. Kaminsky V. V., Soloviev S. M. *Fizika tverdogo tela* (Solid state physics), 2001, vol. 43, no. 3, pp. 423–426.
6. Kaminsky V. V., Soloviev S. M., Sudak N. M., Zaldanstanishvili M.I. *Pisma v zhurnal tehnicheckoy fiziki* (Letters to the Journal of Technical Physics), 2020, vol. 46, no. 1, pp. 52–54.
7. Lukyanov L. N., Kutasov V. A., Konstantinov P.P. *Perspektivnye materialy* (Promising materials), 2006, no. 3, pp. 52–56.
8. Palazhchenko V. I., Krnienko A. V. *Perspektivnye materialy* (Promising materials), 2006, no. 3, pp. 153–155.
9. Redko R. A., Rodionov N. A., Polshin V. I., Zotova O.V. *Perspektivnye materialy* (Promising materials), 2006, no. 3, pp. 100–102.
10. Ulashkevich Yu. V., Kaminsky V. V., Romanova M. V., Sharenkova N. V. *Fizika i tehnika poluprovodnikov* (physics and technology of semiconductors), 2018, vol. 52, no. 2, pp. 184–188.
11. Ulashkevich Yu. V., Kaminsky V. V., Soloviev S. M., Sharenkova N. V. *Fizika i tehnika poluprovodnikov* (Physics and technology of semiconductors), 2019, vol. 53, no. 11, pp. 1544–1546.
12. Shelimova L. E., Konstantinov P. P., Karpinsky O. G., Kretova M. A., Zemskov V. S., Avilov E. S. *Perspektivnye materialy* (Promising materials), 2006, no. 3, pp. 34–36.
13. Kaminsky V. V., Kazanin M. M., Klishin A. N., Soloviev S. M., Golubkov A. V. *Technical Physics*. 2011. Vol. 81, no. 6. Pp. 150–152.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-20055, <https://rscf.ru/project/22-22-20055/>, при финансовой поддержке правительства Забайкальского края

Информация об авторе

Степанов Николай Петрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: термоэлектричество, магнитные свойства Bi-Te
np-stepanov@mail.ru

Габко Геннадий Иванович, канд. физ.-мат. наук, доцент, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: термоэлектричество, релаксационные свойства неупорядоченных полупроводников
gigrabko@gmail.com

Information about the author

Nikolay Stepanov, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Research interests: thermoelectricity, magnetic properties of Bi-Te

Gennady Grabko, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Research interests: thermoelectricity, relaxation properties of disordered semiconductors

Для цитирования

Степанов Н. П., Грабко Г. И. Природный пирит n- и p-типа проводимости как перспективный природный материал для создания преобразователей тепловой энергии в электрическую // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 9. С. 25–32. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-9-25-32.

Stepanov N., Grabko G. Natural pyrite of n- and p-type conductivity as a promising natural material for the creation of converters of thermal energy into electrical // Transbaikal State University Journal, 2022, vol. 28, no. 9 pp. 25–32. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-9-25-32.

Статья поступила в редакцию: 07.10.2022 г.

Статья принята к публикации: 18.11.2022 г.