

Увлечение электронов фононами в Ag_2S

© С.А. Алиев, Ф.Ф. Алиев[¶], З.С. Гасанов, С.М. Абдуллаев, Р.И. Селим-заде

Институт физики Академии наук Азербайджана,
370143 Баку, Азербайджан

(Получена 9 июля 2009 г. Принята к печати 30 ноября 2009 г.)

Исследованы температурные зависимости коэффициента теплопроводности (χ) и термоэдс (α) в Ag_2S в интервале 4.2–300 К. Обнаружено, что при $T < 100$ К величина α резко растет ($\alpha \propto T^{-3}$) с уменьшением T , при 16–18 К проходит через максимум. Коэффициент теплопроводности проходит через максимум при ~ 30 К. Установлено, что резкое возрастание α обусловлено эффектом увлечения электронов длинноволновыми фононами. Показано, что смещение максимумов α и χ , а также температурная зависимость фоновой термоэдс $\alpha_{\text{ph}} \propto T^{-3}$ находятся в согласии с теорией Херринга.

1. Введение

Известно, то при наличии вдоль образца теплового потока носители заряда могут увлекаться длинноволновыми фононами, создавая дополнительную термоэдс увлечения α_{ph} . Условием реализации эффекта является сближение волновых чисел электронов и фононов $k_e \approx k_{\text{ph}}$, выполняемое при относительно низких температурах. В кристаллах с понижением температуры возрастают как теплопроводность χ_{ph} , так и термоэдс увлечения α_{ph} . Естественный предел возрастанию χ_{ph} создают границы кристалла, ограничивающие длину свободного пробега фононов l_{ph} . После достижения максимальной величины l_{ph} , соответствующей минимальному размеру образца, при дальнейшем понижении температуры величина χ_{ph} резко падает вследствие уменьшения теплоемкости фоновый газ. Аналогично ведет себя и α_{ph} , уменьшаясь после максимума вследствие возрастания времени релаксации носителей заряда, взаимодействующих с длинноволновыми фононами. Поскольку в теплопроводности кристалла участвует весь фоновый спектр, для которого эффективная длина свободного пробега \bar{l}_{ph} меньше, чем у фононов, участвующих в процессе увлечения $\bar{l}_{\text{ph}} < l_{\text{ph}}$, то положение максимума α_{ph} по сравнению с максимумом χ_{ph} должно быть сдвинуто в сторону низких температур. Ввиду того что положение максимумов зависит непосредственно от размеров исследуемого образца, для экспериментального выяснения вопроса, измерения χ_{ph} и α_{ph} необходимо проводить одновременно на одном и том же образце. Данному вопросу посвящено несколько работ [1–10]. Обнаружено, что в большинстве случаев, вопреки сказанному, максимумы χ_{ph} и α_{ph} совпадают. Данная работа также посвящена совместному исследованию фоновой теплопроводности и термоэдс в Ag_2S . Интерес к Ag_2S вызван тем, что в нем концентрация электронов мала, а их эффективная масса вдвое больше, чем в кристаллах $p\text{-InSb}$ и $p\text{-GaSb}$. Поэтому в Ag_2S можно было ожидать весьма сильное увлечение электронов фононами.

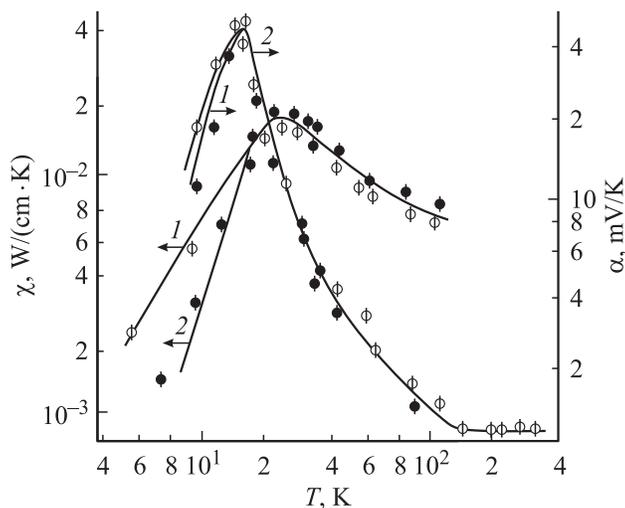
2. Эксперимент

Измерения коэффициентов теплопроводности и термоэдс проводились в криостате, предназначенном для измерения кинетических коэффициентов в области 2–300 К [11]. Измерения температуры в интервале 5–40 К проводились угольными термометрами сопротивления. Синтез и выращивание монокристаллов Ag_2S производились медленным охлаждением одного торца ампулы. Образцы Ag_2S были получены с избытком S и с избытком Ag (до 0.2 ат%). Избыток серы и серебра приводит к незначительному изменению электрических свойств Ag_2S . На рисунке представлены температурные зависимости χ и α для двух образцов Ag_2S . Как видно, в данном случае в Ag_2S начиная с 100 К с уменьшением T термоэдс сильно увеличивается, проходя через максимум при $\sim 16\text{--}18$ К. Коэффициент теплопроводности значительно ниже, чем в кристаллах $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, температурный ход χ в области 100–300 К не резкий, максимум расположен при более высокой температуре (~ 30 К).

3. Обсуждение результатов

Из кривых $\alpha(T)$ следует, что в кристаллах $n\text{-Ag}_2\text{S}$ действительно имеет место сильное увлечение электронов фононами. Начиная с $T = 100$ К α_{ph} намного превышает диффузионную составляющую α . Поэтому данные α при $T < 100$ К можно принять за счет эффекта увлечения α_{ph} . Поскольку электропроводность σ в Ag_2S мала, кривую $\chi(T)$ также можно принять за фоновую долю χ_{ph} . Из этих данных следует, что в $n\text{-Ag}_2\text{S}$ максимумы α_{ph} расположены при значительно более низких $T \approx 16\text{--}18$ К, нежели максимумы χ_{ph} (~ 30 К), т.е. в данном случае реализуется предсказание теории. Данные по χ_{ph} следует интерпретировать в рамках теории Каллавея [12,13], которая позволяет учесть всевозможные механизмы рассеяния. Однако в кристаллах Ag_2S отсутствуют некоторые данные для количественного сопоставления данных $\chi_{\text{ph}}(T)$ с этой теорией. Несмотря на это даже качественное сопоставление позволяет заключить, что в Ag_2S имеется достаточное количество

[¶] E-mail: farzali@physics.ab.az.



Температурные зависимости теплопроводности (χ) и термоэдс (α) в Ag_2S : 1 — стехиометрический состав, 2 — с избытком серебра в 0.1 ат%.

структурных дефектов, приводящих к столь интенсивному рассеянию фононов. По этой же причине занижены значение χ и степень n в зависимости $\chi \propto T^{-n}$ (в области до максимума 100–30 К). По аналогии с другими халькогенидами серебра [14,15] можно полагать, что и в Ag_2S имеет место влияние нормальных процессов на величину χ . Здесь примечательным является то, что в образце с избытком Ag, после максимума с понижением T , χ убывает почти по закону $\chi \propto T^{-3}$. Хотя это следует из общей теории теплопроводности, однако в эксперименте редко реализуется.

Анализ температурной зависимости $\chi_{ph}(T)$ следует проводить по теории Херринга, согласно которой величина α_{ph} определяется формулой [16]

$$\alpha_{ph} = \frac{k_0}{e} \frac{m^* V_0 \tau_{ph}}{3k_0 T \tau_e},$$

где k_0 — постоянная Больцмана, m^* — эффективная масса носителей заряда, V_0 — групповая скорость длинноволновых фононов, взаимодействующих с носителями заряда (скорость звука), τ_e — время релаксации носителей заряда, обусловленное только этим процессом взаимодействия, τ_{ph} — полное время релаксации длинноволновых фононов, определяемое их взаимодействием со всем фононным спектром кристалла, с носителями заряда, дефектами и границами кристалла.

Из формулы следует, что наиболее благоприятные условия для наблюдения эффекта увлечения создаются в кристаллах с большей величиной τ_{ph} (т.е. с высокой теплопроводностью), конечно при не слишком малой эффективной массе носителей заряда. Температурный ход α_{ph} определяется температурным ходом τ_{ph}/T . Так как зависимость τ_{ph} обуславливается симметрией кристалла [16], общая зависимость $\alpha_{ph}(T)$ в области возрастания α_{ph} не имеет универсального вида.

Для определения $\alpha_{ph}(T)$ нужно принять, что $\tau_e \propto T^{-3/2}$, как это должно быть при рассеянии носителей заряда на акустических колебаниях решетки. Из данного соотношения следует, что большая эффективная масса носителей заряда, отсутствие вырождения электронного газа и большое значение τ_{ph} длинноволновых фононов в Ag_2S обуславливают сильный эффект увлечения электронов фононами. Остальные величины, входящие в формулу, слабо зависят от T .

Согласно этим рассуждениям, для кубических кристаллов α_{ph} должна зависеть от T как $\alpha_{ph} \propto T^{-3.5}$, а для кристаллов тригональной системы $\alpha_{ph} \propto T^{-3}$. С понижением T рассеяние носителей заряда на ионизованных примесях усиливается, что и приводит к ослаблению эффекта увлечения, и это сказывается на зависимости $\alpha_{ph}(T)$. Когда длина свободного пробега фононов достигает минимальных размеров образца ($\tau_{ph} = \text{const}$), температурный ход $\alpha_{ph}(T)$ начинает определяться изменением величины $1/T\tau_e$ от температуры и при $\tau_e \propto T^{-3/2}$ $\alpha_{ph} \propto T^{0.5}$.

4. Заключение

Таким образом, полученные данные по зависимости $\alpha_{ph}(T)$ как до максимума, так и после него находятся в качественном согласии с теорией Херринга.

Список литературы

- [1] И.Н. Тимченко, С.С. Шалыт. ФТТ, **4** (1962).
- [2] С.А. Алиев, А.Я. Нашельский, С.С. Шалыт. ФТТ, **7** (5), 1590 (1965).
- [3] С.А. Алиев, С.С. Шалыт. ФТТ, **7** (12), 3690 (1965).
- [4] С.А. Алиев, Л.Л. Коренблит, С.С. Шалыт. ФТТ, **8** (3), 705 (1966).
- [5] С.А. Алиев. ФТП, **7** (1), 168 (1973).
- [6] С.А. Алиев. *Некоторые вопросы экспериментальной и теоретической физики* (Баку, Элм, 1977).
- [7] Т.Г. Гаджиев, С.А. Алиев, Р.И. Селим-заде. Изв. вузов. Физика, **33** (4), 112 (1990).
- [8] С.А. Алиев, Р.И. Селим-заде, Т.Г. Гаджиев. Физика НАНА, **3**, 8 (1998).
- [9] С.А. Алиев, Э.И. Зульфигаров, Р.И. Селим-заде, З.Ф. Агаев. ФТП, **43** (9), 1183 (2009).
- [10] С.А. Алиев. *Явления переноса заряда и тепла в узкощелевых и бесщелевых полупроводниках* (Баку, Элм, 2008).
- [11] С.А. Алиев, Д.Г. Араслы, З.Ф. Агаев, Э.И. Зульфигаров, Ш.С. Исмаилов. Изв. АН АзССР. Сер. физ.-техн. и мат. наук, **6**, 67 (1982).
- [12] J. Callaway. Phys. Rev., **113** (4), 1046 (1959).
- [13] J. Callaway, H.C. Balyez. Phys. Rev., **120** (4), 1149 (1960).
- [14] С.А. Алиев, Ф.Ф. Алиев, З.С. Гасанов. Изв. АН СССР. Неорг. матер. **26**, 1767 (1990).
- [15] С.А. Алиев, Ф.Ф. Алиев, С.Г. Абдинова, З.С. Гасанов, Д.М. Рагимова. Изв. вузов. Физика, **6**, 41 (1970).
- [16] С. Herring. Phys. Rev., **95**, 954 (1954); Holdleiteza Phosphoze, **5**, 184 (1958).

Редактор Т.А. Полянская

Electrons drag by Phonons in Ag_2S

S.A. Aliyev, F.F. Aliyev, Z.S. Gasanov, S.M. Abdullayev,
R.I. Selim-zade

Institute of Physics,
Azerbaijan National Academy of Sciences,
370143 Baku, Azerbaijan

Abstract The temperature dependences of the thermal conductivity (χ) and thermal power (α) of $p\text{-Ag}_2\text{S}$ have been investigated in 4.2–300 K temperature interval. It was observed, that at $T < 100$ K α abruptly increases ($\alpha \propto T^{-3}$) with decreasing of T , at $\sim 16\text{--}18$ K passes through maximum. The thermal conductivity coefficient passes through one at ~ 30 K. It is established, that the abruptly increasing of α is caused by drag effect of holes by long wave phonons. It is shown, that the displacement of maximums α and χ and the temperature dependence of phonons thermal power ($\alpha_{\text{ph}} \propto T^{-3}$) are in agree with Herrings theory.