

# ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ НЕРНСТА-ЭТТИНГСГАУЗЕНА В Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te В УСЛОВИЯХ ФОНОННОГО УВЛЕЧЕНИЯ

**С.А. АЛИЕВ, Р.И. СЕЛИМ-ЗАДЕ, Т.Г. ГАДЖИЕВ**

*Институт Физики АН Азербайджана,*

*370143, Баку, пр. Г. Джавида, 33*

Проведен анализ температурных зависимостей (5-100 К) коэффициентов магнитотермоэдс  $\alpha$  и продольного эффекта Нернста-Эттингсгаузена  $\Delta\alpha$  в n-Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te ( $x=0,2$ ). На кривых зависимостей  $\alpha(T)$  и  $\Delta\alpha(T)$  обнаружены два экстремума. Выделена фононная доля  $\alpha$  и  $\Delta\alpha$ . Установлено, что в магнитном поле уменьшаются величина  $\alpha_{ph}$  и показатель степени в зависимости  $\alpha_{ph} \sim T^{-k}$  (от 3,5 до 1,5). Показано, что наблюдаемые особенности  $\alpha$ ,  $\Delta\alpha$  и  $\alpha_{ph}$  обусловлены как эффектом увлечения электронов фононами, так и подавлением в магнитном поле вклада высокоподвижных электронов в диффузионную и фононную части  $\alpha$  и  $\Delta\alpha$ .

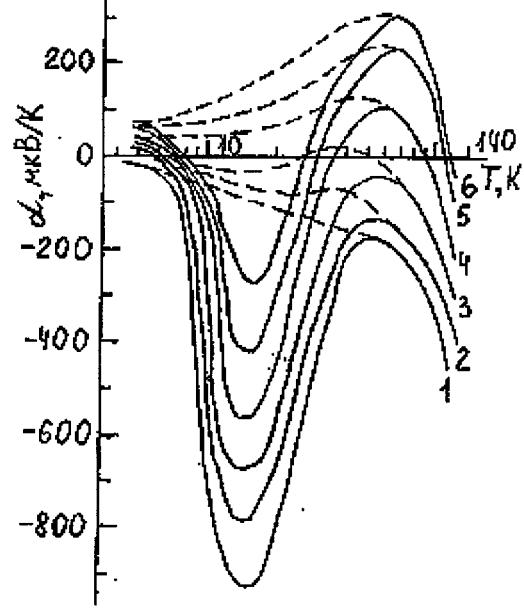
## Введение.

Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных термоэдс фононного увлечения, вопрос о влиянии на нее магнитного поля остается открытым. Исследования магнитотермоэдс следует проводить в узкозонных и бесщелевых полупроводниках благодаря участию в их проводимости высокоподвижных носителей заряда. Для этой цели твердые растворы Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te являются наиболее удобным объектом, поскольку в этой системе реализуются узко- и бесщелевые состояния, вследствие чего можно получать кристаллы с преобладанием как р-так и н-типа проводимости, и также смешанной проводимости, в них можно варьировать концентрацию носителей заряда в достаточно широком интервале и т.д.

## Экспериментальные результаты.

В работе [1] мы сообщали, что в образце n-Cd<sub>0,2</sub>Hg<sub>0,8</sub>Te с концентрациями носителей заряда  $n=3,7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $p=1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (при  $T=4,2$  К) в области температур 10-40 К наблюдается сильное увлечение электронов фононами. При 12 К фононная доля термоэдс  $\alpha_{ph}$  превышала диффузионную  $\alpha_{dif}$  на порядок величины, тогда как в образце p-Cd<sub>0,14</sub>Hg<sub>0,8</sub>Te с  $p=4,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $n=8,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  [2] величины  $\alpha_{dif}$  и  $\alpha_{ph}$  примерно равны. Можно было полагать, что такой сильный эффект увлечения должен оказать соответствующее влияние и на термомагнитные эффекты Нернста-Эттингсгаузена (Н-Э), исследование которых может пролить свет на механизм воздействия магнитного поля на эффект увлечения. С этой целью в данной работе исследован продольный эффект Н-Э в образце n- Cd<sub>0,2</sub>Hg<sub>0,8</sub>Te. Измерения термоэдс  $\alpha_0$  и магнитотермоэдс  $\alpha$  производились в криостате, описанном в [3]. Интервалы температур и индукции магнитного поля, где производились измерения, были соответственно  $4,2 \leq T \leq 100$  К и  $0 \leq B \leq 12,2$  кГс. На рис. 1 сплошными кривыми представлены температурные зависимости термоэдс и магнитотермоэдс при различных значениях индукции поля. Как видно,  $\alpha_0$  во всем исследованном интервале температур отрицательна, с понижением  $T$  ( $T \leq 60$  К) наблюдается резкий экстремум, что характерно для эффекта увлечения носителей фононами. В магнитном поле характер кривых  $\alpha(T)$  качественно не меняется

ся, но величина  $\alpha$  значительно уменьшается, появляются две области с положительным значением магнитотермоэдс (при  $T \leq 8$  К и  $30 \leq T \leq 100$  К). В полях  $1,5 \leq B \leq 4$  кГс наблюдается одна точка инверсии знака  $\alpha(T)$ , а при  $B \geq 5$  кГс  $\alpha(T)$  трижды меняет знак. Отметим, что с ростом индукции  $B$  низкотемпературная точка инверсии знака  $\alpha(T)$  смещается в область высоких  $T$ , а высокотемпературная точка смены знака  $\alpha(T)$  - в область низких температур.



*Рис. 1. Температурная зависимость термоэдс и магнитотермоэдс в n-Cd<sub>0,2</sub>Hg<sub>0,8</sub>Te. Сплошные линии- эксперимент, пунктирные линии - рассчитанная диффузионная часть  $B$ , кГс:*  
1 - 0; 2 - 1,9; 3 - 3,5; 4 - 5,5; 5 - 9; 6 - 12,2.

## Обсуждение результатов

Температурные зависимости  $\alpha_0$  и  $\alpha$  можно качественно объяснить участием в проводимости n-Cd<sub>0,2</sub>Hg<sub>0,8</sub>Te двух типов носителей заряда с сильно различающимися концентрациями и подвижностями, а также процессом увлечения электронов фононами. Однако, с целью выявления более конкретных данных о влиянии магнитного поля на эффект увлечения, необходимо выделить все

составляющие  $\alpha_0$  и  $\alpha$  в области его действия. Для этого необходимо вычислить диффузионную часть термоэдс  $\alpha_{0dif}$  при  $B=0$  и магнитотермоэдс  $\alpha_{dif}$  при  $B\neq 0$ , выделить фононную часть термоэдс  $\alpha_{0ph}=\alpha_0-\alpha_{0dif}$  и магнитотермоэдс  $\alpha_{ph}=\alpha-\alpha_{dif}$ , а также определить поперечный эффект Н-Э (как диффузионную часть  $\Delta\alpha_{dif}=\alpha_{dif}-\alpha_{0dif}$ , так и общую часть  $\Delta\alpha_{0ph}=\alpha-\alpha_0$ ).

Известно, что в случае смешанной проводимости термоэдс в магнитном поле имеет вид [4]:

$$\alpha(B)=\alpha_p(\alpha_n, \sigma_n, \sigma_e, R_n, R_e, B) + \alpha_n(\alpha_e, \sigma_e, \sigma_n, R_e, R_n, B) + \alpha_{NE},$$

где  $\alpha_p$  - дырочный вклад в термоэдс,  $\alpha_n$  - электронный вклад в термоэдс,  $\alpha_{NE}$ -слагаемое, учитывающее вклад поперечного эффекта Н-Э,  $\alpha_i$  - парциальная термоэдс дырок ( $i=h$ ) и электронов ( $i=e$ ),  $R_i$ -парциальный коэффициент Холла носителей,  $\sigma_i$  - соответствующие парциальные проводимости. Парциальную термоэдс носителей в произвольном поле  $B$  можно рассчитать как [4]

$$\alpha(B) = \alpha_0 + \Delta\alpha = \alpha_0 + \frac{(\mu\beta)^2}{1 + (\mu\beta)^2} \Delta\alpha_{\infty}$$

Таким образом, для выделения диффузной части полной термоэдс необходимо рассчитать парциальные термоэдс носителей, что в конечном счете сводится к определению концентраций ( $n, p$ ) и подвижностей ( $\mu_e, \mu_h$ ) носителей заряда. В работах [2,5] нами подробно описана методика расчета параметров носителей заряда в бесщелевых Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te путем решения системы четырех уравнений, описывающих коэффициент Холла в области слабых и сильных магнитных полей, точки инверсии знака коэффициента Холла и коэффициента проводимости.

Результаты расчета температурной зависимости магнитотермоэдс представлены на рис.1 пунктирными линиями. Как видно, расчет достаточно хорошо описывает поведение зависимости  $\alpha(T)$  вне области действия эффекта увлечения: появление высокотемпературного экстремума, смена знака  $\alpha(T)$  при высоких температурах. Таким образом, можно заключить, что максимум  $\alpha(T)$  в интервале  $40 \leq T \leq 90$  К обусловлен диффузионной частью  $\alpha$  двух типов носителей. На рис.2 представлены температурные зависимости фононной части термоэдс при различных значениях индукции  $B$ . Видно, что с ростом индукции поля (до 12 кГс)  $\alpha_{ph}$  уменьшается почти в два раза, положение максимума на температурной шкале слегка смещается в область высоких  $T$ , начало проявления и исчезновения эффекта увлечения смещаются соответственно в сторону низких и высоких температур. Показатель степени в зависимости  $\alpha(T) \sim T^{-k}$  в интервале 50-20 К с ростом  $B$  уменьшается от  $k=3,5$  до  $1,5$ . Температурная зависимость  $\alpha_{ph} \sim T^{-3,5}$  находится в согласии с теорией Херринга [6]. Следует заметить, что такая зависимость  $\alpha_{ph}(T)$  наблюдается редко. В кристаллах A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> и A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>  $\alpha_{ph}$  значительно меньше теоретического значения

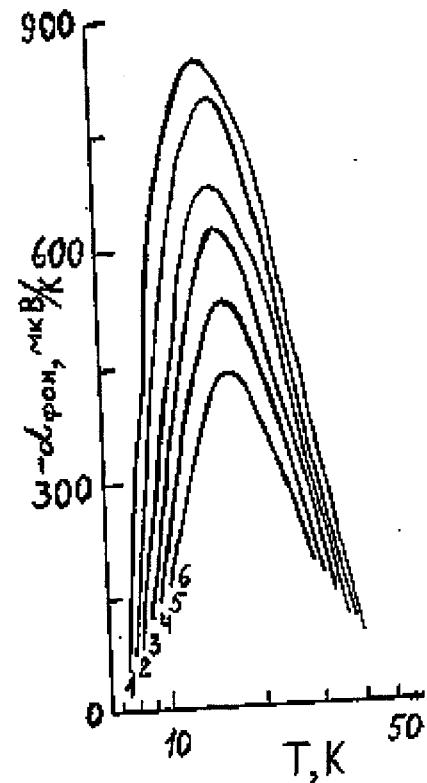


Рис.2. Температурная зависимость термоэдс и магнитотермоэдс в n-Cd<sub>0,2</sub>Hg<sub>0,8</sub>Te.  
B, кГс: 1- 0; 2- 1,9; 3- 3,5; 4- 5,5; 5- 9; 6- 12,2.

[7,8]. Авторы предполагали, что на эффект увлечения сильное влияние оказывают микронеоднородности, примеси, дислокации и другие несовершенства кристаллической решетки. Также можно предположить, что меньшее значение  $\alpha_{ph}$  обусловлено и низкой концентрацией носителей. Уменьшение  $\alpha_{ph}$  и  $k$ , сужение области проявления эффекта увлечения в магнитном поле связано с тем, что под действием магнитного поля сильно уменьшается электронная доля термоэдс (поскольку в этой области температур реализуется рассеяние носителей заряда на ионизированных примесях), при этом дырочный вклад начинает сильно возрастать и превалирует над электронным. Естественно, это должно привести к уменьшению термоэдс увлечения электронов.

На рис. 3 представлены температурные зависимости коэффициента продольного эффекта Н-Э. Как видно, в области  $T \approx 70$  К имеет место резкий максимум  $\Delta\alpha(T)$ , далее при  $T \sim 70$  К наблюдается менее выраженный экстремум. Сопоставление этих кривых с расчетом диффузионной доли  $\Delta\alpha_{dif}$  (см. рис.4) позволяет заключить, что первый максимум  $\Delta\alpha(T)$  обусловлен эффектом увлечения, высокотемпературный же обусловлен диффузионным механизмом  $\Delta\alpha_{dif}$  в случае двух типов носителей. Сдвиг положения этого максимума по температурной шкале обусловлен подавлением в магнитном поле высокоподвижных электронов и возрастания тем самым дырочного вклада в  $\Delta\alpha$ .

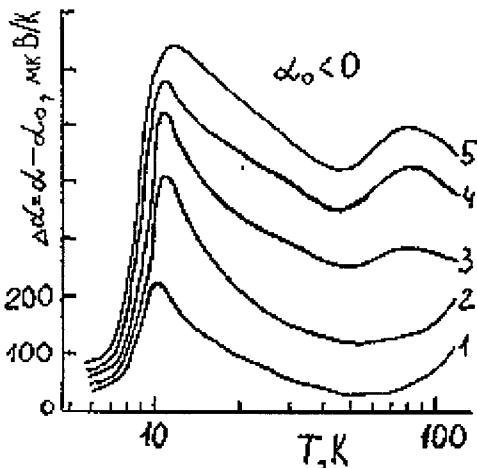


Рис.3. Температурная зависимость коэффициента продольного эффекта Нернста-Эттингсгаузена в  $n\text{-Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ .  
В, кГс: 1 - 1,9; 2 - 3,5; 3 - 5,5; 4 - 9; 5 - 12,2.

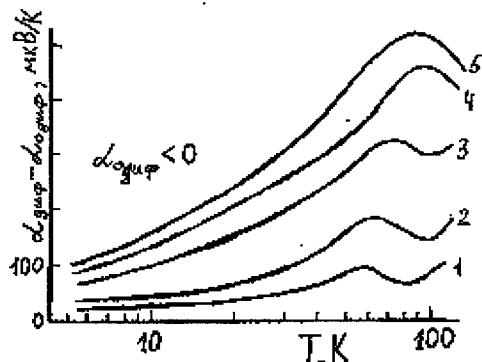


Рис.4. Температурная зависимость расчитанной диффузной части  $\Delta\alpha$  в  $n\text{-Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ .  
В, кГс: 1 - 1,9; 2 - 3,5; 3 - 5,5; 4 - 9; 5 - 12,2.

- [1] С.А. Алиев, Р.И. Селим-заде. Тезисы III Всесоюз. научно-техн. конф. "Материаловедение халькогенидных полупроводников". Изд.ЧГУ.г. Черновцы, 1991, т. 1, с. 57.
- [2] Т.Г. Гаджиев, С.А. Алиев, Р.И. Селим-заде. Изв. вузов СССР, Физика, 1990, т. XXXIII, № 4, с. 112-114.
- [3] С.А. Алиев, Д.Г. Араслы, З.Ф. Агаев, Ш.С. Исмайлова, Э.И. Зульфигаров. Изв. АН Азерб. ССР, Сер. ФТМН, 1982, №6, с. 67-71.
- [4] Б.М. Аслеров. В кн. "Электронные явления переноса в полупроводниках". М.:Наука, 1985, с. 320.

- [5] С.А. Алиев, Р.И. Селим-заде, Т.Г. Гаджиев. Изв. вузов СССР. Физика, 1985, т. ХХVIII, №7, с. 128.
- [6] C. Herring. Phys. Rev., 1954, v.96, p.5, p.1163-1186.
- [7] С.А. Алиев, А.Я. Нашельский, С.С. Шалым. ФТТ, 1965, т.7, №5, с.1590-1592.
- [8] С.А. Алиев. сб.: "Некоторые вопросы экспериментальной и теоретической физики", Баку, Элм, 1977, с.132-143.

S.A. Əliyev, R.I. Səlim-zadə, T.H. Hacıyev

## FONONLAR TƏRƏFİNDƏN SÖVQETMƏ ŞƏRAİTİNDƏ $Cd_xHg_{1-x}Te$ -DA NERNST-ETTİNQSHAUZEN EFFEKLTLƏRİ

$n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x=0,2$ )-da maqnitotermo e.h.q. və uzununa Nernst-Ettinqshauzen  $\Delta\alpha$  əmsallarının temperatur ( $5 \leq T \leq 100$  K) asılılığı analiz olunmuşdur.  $\alpha(T)$  və  $\Delta\alpha(T)$  asılılığında iki ekstremum müşahidə olunmuşdur.  $\alpha_F$  və  $\Delta\alpha$ -nın fonon hissələri ayrılmışdır. Maqnit sahəsində  $\alpha_F$  kəmiyyətinin və  $\alpha_F \sim T^{-k}$  asılılığında üst dərəcənin azalması (3.5-dən 1.5 qədər) göstərilmişdir.  $\alpha$ ,  $\Delta\alpha$  və  $\alpha_F$ -da müşahidə olunan xüsusiyyətlər həm elektronların fononlar tərəfindən sövq edilməsi, həm də yüksək yüksəklü elektronların  $\alpha$  və  $\Delta\alpha$  diffuzion və fonon hissələrinə tə'sirinin maqnit sahəsində azalması ilə əlaqədar olması göstərilmişdir.

S.A. Aliev, R.I. Selim-zade, T.G. Gadzhiev

## THE NERNST-ETTINGSHAUZEN TERMOMAGNETIC EFFECTS IN $Cd_xHg_{1-x}Te$ AT THE PHONON DRAG CONDITIONS

The temperature dependence ( $5 \leq T \leq 100$  K) of the coefficients of the magnitothermal power  $\alpha$  and the longitudinal Nernst-Ettingshauzen effect  $\Delta\alpha$  in  $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x=0.2$ ) have been analyzed. The two extrema on the  $\alpha(T)$  and  $\Delta\alpha(T)$  dependences have been observed. It is established that the  $\alpha_{sp}$ -value and the degree power in  $\alpha_{ph} \sim T^{-k}$ -dependence (from 3.5 to 1.5) have been decreased in magnetic field. It is shown that the observed peculiarities of  $\alpha$ ,  $\Delta\alpha$  and  $\alpha_{ph}$  have been stipulated both by the phonon drag of electrons and by the suppression of high-mobility electrons deposition in diffusion and phonon parts of  $\alpha$  and  $\Delta\alpha$  in magnetic field.