

## Термоэдс $n$ -InSb в поперечном квантующем магнитном поле

© М.М. Гаджалиев<sup>¶</sup>, Р.Р. Баширов, З.Ш. Пирмагомедов, Т.Н. Эфендиева, Х. Медге\*, К. Филар\*

Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук, 367003 Махачкала, Россия

\* Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур (ILHMFLT), Вроцлав, Польша

(Получена 18 сентября 2014 г. Принята к печати 18 ноября 2014 г.)

Исследована термоэдс электронного антимионид индия при 80 К в поперечном магнитном поле до 14 Тл. Установлено, что в квантующем магнитном поле экспериментальные результаты согласуются с теоретическими данными, полученными без учета спинового расщепления уровней Ландау.

Известно, что термоэдс складывается из двух составляющих:  $\alpha^e$  и  $\alpha^{ph}$ , где  $\alpha^e$  — электронная (или диффузионная),  $\alpha^{ph}$  — фононная доля термоэдс.

В работе [1] впервые теоретически было предсказано, что в поперечном квантующем ( $\hbar\Omega > kT$ ) магнитном поле ( $\hbar$  — постоянная Планка, деленная на  $2\pi$ ;  $\Omega = eH/m^*c$ ,  $e$  — заряд электрона,  $H$  — напряженность магнитного поля;  $m^*$  — эффективная масса носителей заряда,  $c$  — скорость света,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура) электронная доля термоэдс  $\alpha_{\perp}^e$  полупроводника с невырожденной статистикой носителей тока увеличивается пропорционально логарифму отношения  $\hbar\Omega/2kT$ .

Резкое увеличение термоэдс в квантующем магнитном поле (КМП) впервые было показано экспериментами, проведенными в Институте физики им. Х.И. Амирханова [2].

Исследования, выполненные авторами работ [3,4], подтвердили экспериментальный факт увеличения термоэдс в КМП и показали, что основной вклад в рост термоэдс вносит изменение фононной составляющей термоэдс благодаря тому, что с электронами взаимодействуют не только длинноволновые фононы, но и коротковолновые (тепловые) фононы в результате увеличения импульса электронов в КМП.

В настоящей работе обсуждаются результаты измерения термоэдс  $n$ -InSb с концентрацией электронов  $n \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в поперечном КМП до 14 Тл при средней температуре 80 К на магните международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (ILHMFLT) в г. Вроцлаве (Польша).

Для узкозонного полупроводника типа  $n$ -InSb с концентрацией носителей тока  $n \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  квантовый предел  $\hbar\Omega/2kT \gg 1$  наступает при  $T = 80 \text{ К}$  в магнитном поле  $H > 20 \text{ кЭ}$ . Согласно теории [1], в квантовом пределе увеличение магнитного поля способствует выполнению критерия отсутствия вырождения электронного газа. Следовательно, для интерпретации результатов эксперимента по термоэдс в магнитном поле до 14 Тл можно использовать формулы, полученные для материала с невырожденной статистикой носителей заряда.

Согласно теоретическим работам [1,5,6], на термоэдс в КМП влияют непараболичность зоны проводимости и

спиновое расщепление уровней Ландау, причем влияние непараболичности незначительно, а спинового расщепления достаточно существенное.

В работе [1] вычислена термоэдс в квантовом пределе в поперечном КМП с учетом слабой непараболичности ( $kT/\varepsilon_g \ll 1$ ) и спинового расщепления уровней Ландау ( $Sg\mu H > kT$ ) (где  $\varepsilon_g$  — ширина запрещенной зоны,  $S = \pm 1/2$ ,  $\mu$  — магнетон Бора,  $g$  — фактор Ланде):

$$\alpha_{\perp}^e(H) = \alpha^P(H) - (k/e)(kT/\varepsilon_g) \left[ \frac{3}{2} + v_0 \text{cth } v_0 - v_1 \text{th } v_1 + (v_0^2/Sh^2v_0)(1 + 4v_0 \text{cth } v_0 - 2v_1 \text{th } v_1) + (v_1^2/\text{ch}^2 v_1)(1 + 2v_0 \text{cth } v_0) \right], \quad (1)$$

где  $v_0 = \hbar\Omega/2kT$ ,  $v_1 = 1/2|g^*|(m_n/m_0)v_0$ .

$$\alpha^P(H) = -\frac{k}{e} \left( \frac{3}{2} + v_0 \text{cth } v_0 - v_1 \text{th } v_1 - \ln \left[ \frac{4n\pi^{3/2}\hbar^3}{(2m_nkT)^{3/2}} \frac{Shv_0}{v_0 \text{ch } v_1} \right] \right)$$

— термоэдс для параболической зоны ( $\varepsilon_g \rightarrow \infty$ ).

Как видно из (1), изменение термоэдс, обусловленное спиновым расщеплением уровней Ландау, довольно существенное.

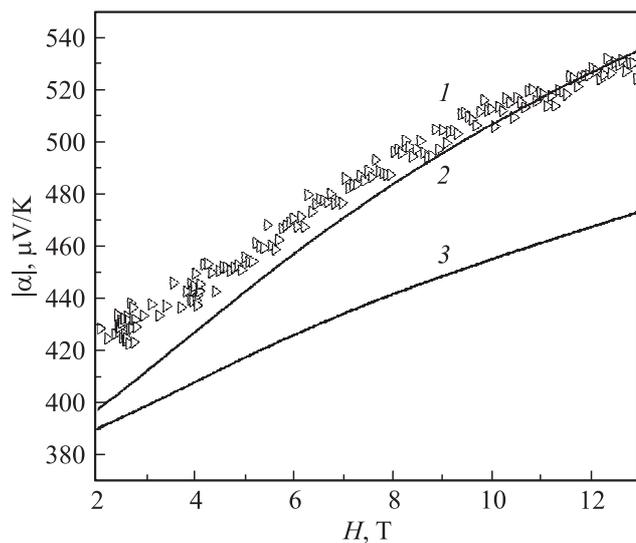
С целью экспериментальной проверки поведения электронной доли поперечной магнетотермоэдс в КМП, как было отмечено выше, измерения проводили в полях до 14 Тл в области температур, где в нулевом поле нет фононной доли термоэдс.

Результаты эксперимента приведены на рисунке (кривая 1). Там же представлены вычисленные по формуле (1) значения электронной доли магнетотермоэдс в поперечном КМП с учетом (кривая 3) и без учета спинового расщепления уровней Ландау (кривая 2).

Как следует из работ [1,6], эксперименты [2–4] не обнаружили изменения магнетотермоэдс, обусловленного спиновым расщеплением.

Измерения в КМП до 14 Тл, проведенные в области температуры, где в нулевом поле нет фононного увеличения, показали, что электронная доля термоэдс  $n$ -InSb увеличивается монотонно с ростом поля (кривая 1).

<sup>¶</sup> E-mail: maggadji@rambler.ru



Термоэдс  $\alpha$  в поперечном магнитном поле: 1 — эксперимент, 2 — расчет без учета, 3 — с учетом спинового расщепления.

На рисунке для сравнения с теорией представлены экспериментальные значения термоэдс и вычисленные величины термоэдс в области сильных и КМП. Изменения поперечной термоэдс в области слабых полей не приведены, поскольку эти результаты хорошо объясняются существующей теорией и обсуждены во многих экспериментальных работах [2–4,6,7].

Вычисленные значения без учета спина согласуются с экспериментом в области высоких полей (кривая 2), в то время как термоэдс, рассчитанная с учетом спина, сильно отличается от эксперимента при высоких полях.

На наш взгляд, наблюдаемая разница между экспериментом и вычисленным значением  $\alpha_{\perp}^e$  в КМП обусловлена изменением механизма фононного увлечения при сильном спиновом расщеплении уровней Ландау и возможным изменением теплопроводности при этом.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность профессору В. Нижанковскому за предоставленную возможность проводить измерения в магнитных полях до 14 Тл и за полезные советы по методике эксперимента.

## Список литературы

- [1] Б.М. Аскеров. *Электронные явления переноса в полупроводниках* (М., Наука, 1985).
- [2] Х.И. Амирханов, Р.И. Баширов, М.М. Гаджиалиев. *ФТТ*, **3**, 3743 (1961).
- [3] S.M. Puri, T.H. Geballe. *Phys. Rev.*, **136**, 1767 (1964).
- [4] S.M. Puri. *Phys. Rev.*, **139**, 995 (1965).
- [5] А.И. Ансельм, Р.Г. Тарханян. *ФТТ*, **6**, 3357 (1964).
- [6] И.М. Цидильковский. *Термомагнитные явления в полупроводниках* (М., Физматгиз, 1960).
- [7] М.М. Гаджиалиев, З.Ш. Пирмагомедов, Т.Н. Эфендиева. *ФТП*, **48** (9), 1169 (2014).

Редактор Л.В. Шаронова

## Thermo-emf of $n$ -InSb in transverse magnetic field

M.M. Gadzhialiev, R.R. Bashirov, Z.Sh. Pirmagomedov, T.N. Efendieva, H. Mädge\*, K. Filar\*

Institute of Physics after Kh.I. Amirkhanov,  
Dagestan Scientific Center  
of the Russian Academy of Sciences,  
367003 Makhachkala, Russia

\* International Laboratory of Strong Magnetic Fields  
and Low Temperatures (ILHMFLT)  
Wroclaw, Poland

**Abstract** Thermo-emf of  $n$ -InSb has been investigated in transverse magnetic field up to 14 T at 80 K. It was found, that experimental results for quantizing magnetic field were in quite good agreement with theoretical predictions without taking Landau level spin-splitting into consideration.