

**ВЛИЯНИЕ СПИНА НА ГАЛЬВАНО - И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ  
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

**Р.И. БАШИРОВ**, М.М. ГАДЖИАЛИЕВ, А.Ю. МОЛЛАЕВ

*Институт физики ДагНЦ,  
367003, Махачкала, Россия, ул. М.Ярагского, 94*

Обнаружено и исследовано влияние спинового расщепления уровней Ландау в магнитном поле на магнето-сопротивление и поперечный эффект Нернста-Эттингаузена полупроводников. На основе полученных экспериментальных данных вычислены эффективная масса и g-фактор.

The influence of spin splitting of Landau levels in magnetic field on magneto resistance and transversal effect of Nernst-Ettingshausen semiconductors is found out and calculated. On the basis of obtained experimental data the effective mass and g-factor are calculated.

В конце 50-х годов в Институте физики Дагестанского филиала АН СССР по инициативе Х.И. Амирханова возникло новое направление исследования энергетического спектра полупроводников с помощью экспериментального измерения квантовых осцилляций.

С этой целью в Институте физики была собрана уникальная установка - генератор сильных импульсных магнитных полей, позволяющий получать магнитные поля напряженностью до 300 кЭ. В это же время благодаря усилиям Х.И. Амирханова была запущена криогенная станция, которая дала возможность в эксперименте реализовать температуры кипения жидкого водорода и жидкого гелия.

Известно, что еще в 1930 г. Л.Д. Ландау показал, что в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, энергия электрона становится дискретной и в зоне проводимости материала возникают уровни, которые впоследствии получили название уровней Ландау. Квантовые осцилляции в явлениях переноса проявляются при следующих условиях:

- 1)  $\epsilon_F > 0$
- 2)  $\Omega\tau \gg 1$ ;
- 3)  $\hbar\Omega \gg kT$

( $\epsilon_F$  - энергия Ферми,  $\Omega = eH/m^*c$ ; H - напряженность магнитного поля;  $m^*$  - эффективная масса; e - заряд электрона; c - скорость света;  $\hbar$  - постоянная Планка, деленная на  $2\pi$ ; k - постоянная Больцмана; T - абсолютная температура).

Как известно [1], при низких температурах в достаточно сильных магнитных полях расстояние между соседними уровнями Ландау  $\hbar\Omega$  становится больше теплового размытия уровня Ферми kT, т.е. длина волны де Бройля становится больше радиуса циклотронной орбиты. С другой стороны, известно, что в случае вырожденной системы кинетические свойства зависят от поведения тонкого ( $\sim kT$ ) слоя электронов вблизи граничной энергии Ферми, и поэтому как только какой-либо уровень Ландау проходит через уровень Ферми, резко меняется средняя энергия электронов, вносящих вклад в процесс проводимости тока, ток достигает максимума. Говоря о причине резкого роста тока в резонансной области, следует сказать, что такому росту способствует резкое изменение плотности состояний на уровне Ландау. Далее, когда уровень Ферми будет находиться посередине, между двумя уровнями Ландау, мы будем иметь минимум тока. Таким образом, сила тока регулярно осцилли-

рует в магнитном поле с периодом, определенным интервалом между последовательными совпадениями уровней Ландау с уровнем Ферми.

Спиновое расщепление энергии Ландау, происходит, если в добавление к вышеуказанным условиям выполняется неравенство:  $g\mu_B H > kT$ , т.е. если величина спинового расщепления уровня Ландау становится больше значения теплового размытия уровня Ферми (g - фактор спектроскопического расщепления;  $\mu_B$  - магнетон Бора).

Эти четыре неравенства - необходимые условия обнаружения тонкой структуры осцилляции Шубникова-де Гааза [1].

Осцилляции Шубникова-де Гааза известны и изучены давно. К тому времени, когда под руководством Х.И.Амирханова мы приступили к измерению магнето-сопротивления, не было исследовано влияние спинового расщепления уровней Ландау на квантовые осцилляции. В связи с успехами в технологии получения полупроводников с высокой подвижностью (так, например, был получен n-InSb с подвижностью  $\sim 10^6$  см<sup>2</sup>/В·с) появилась реальная возможность исследования влияния спина на квантовые осцилляции в доступных магнитных полях. Мы впервые показали, что все осцилляционные максимумы магнетосопротивления, кроме нулевого, расщепляются, а также появляется дополнительный  $0^+$  максимум, обусловленный расщеплению нулевого уровня Ландау.

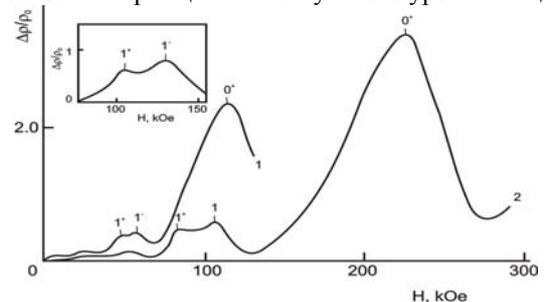


Рис. 1

На рис.1 представлены результаты исследования квантовых осцилляций InSb в импульсных магнитных полях до 300 кЭ при T=4.2 К для трех образцов. Были обнаружены нулевой максимум и расщепление первого и второго максимумов соответствующих первому и второму уровням Ландау [2]. В таблице 1 приведены экспериментальные значения положения  $H_0^+$ ,  $H_1^+$ ,  $H_1$ , максимумов на шкале магнитных полей и рассчитаны значения эффективной массы  $m^*/m_0$  и g-фактора (фактора спектроскопического расщепления).

Таблица 1.

№№ образцов	$n, \text{см}^{-3}$	$m^*/m_0$	$H^+, \text{кОе}$	$H^-, \text{кОе}$	$H_1, \text{кОе}$	$ q _0^+$	$ q _1^-$	$ q _1^+$	$ q _{\text{пов}}$
5	$9,4 \cdot 10^{16}$	0,020	113	58	47	29	-	-	33
6	$2,7 \cdot 10^{17}$	0,022	223	105	82	30	32	32	29
7	$3,8 \cdot 10^{17}$	0,024	-	130	104	-	23	20	27

Нами были обнаружены и исследованы квантовые осцилляции  $n\text{-InAs}$ ,  $n\text{-HgSe}$  и в широкозонных полупроводниках  $n\text{-GaAs}$  и  $n\text{-InP}$ .

Квантовые осцилляции магнетосопротивления электронного арсенида галлия с различной концентрацией электронов измерены при температурах 4,2; 14 и 20 К в импульсных магнитных полях до 300 кЭ [3]. Измерения проводились при двух направлениях магнитного поля и тока в области слабых электрических полей на образцах размером  $6\text{мм} \times 0,6\text{мм} \times 0,5\text{мм}$ , снабженных омическими контактами. Были измерены поперечное и продольное магнетосопротивления четырех образцов  $n\text{-GaAs}$  с параметрами: образец 1:  $n=1,7 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ ,  $\mu=2060 \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ; образец 2:  $n=4,9 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ ,  $\mu=2500 \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ; образец 3:  $n=7,5 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ ,  $\mu=2800 \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ; образец 4:  $n=4,8 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$ ,  $\mu=2000 \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Эти данные относятся к 4,2 К. Результаты измерений представлены на рис.2,3.

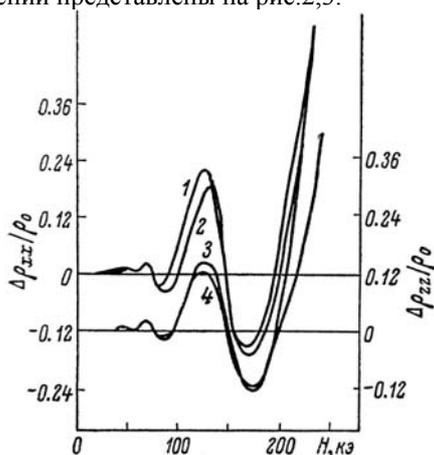


Рис.2

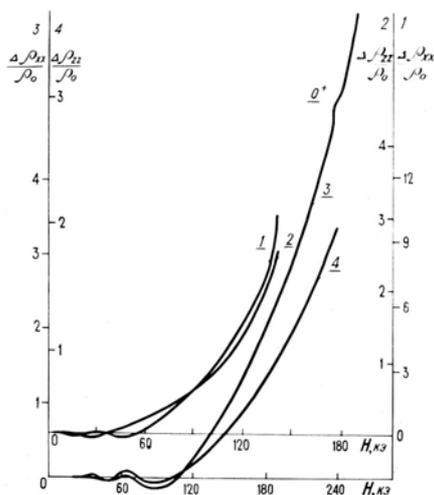


Рис.3

Как видно из рис.2,3 поперечное и продольное магнетосопротивление осциллируют синфазно и периодически по обратному магнитному полю. В образцах 2 и 3 при 4,2, 14 и 20 К в поперечном и продольном магнетосопротивлениях обнаруживаются первые три максимума. Период осцилляции, определенный по положению максимумов, в образце 2:  $\Delta(H^{-1})=5,4 \cdot 10^{-5} \text{Э}^{-1}$  и в образце 3:  $\Delta(H^{-1})=3 \cdot 10^{-5} \text{Э}^{-1}$ . Эти значения периодов удовлетворительно согласуются с расчетными, вычисленными по формуле:

$$\Delta\left(\frac{1}{H}\right)^{\text{Теор}} = \frac{\hbar \cdot e}{m^* \cdot c \cdot \mu_0} = \frac{3,18 \cdot 10^6}{n^{2/3}} \text{ эрст}^{-1} \quad (1)$$

На рис.3 виден слабый  $0^+$  максимум при 240 кОе в поперечном магнетосопротивлении образца 1.

Из измерений температурной зависимости амплитуды первого максимума квантовых осцилляций поперечного магнетосопротивления антимонида индия было найдено, что эффективная масса электрона  $m^*=0,016m_0$ , что в пределах ошибок эксперимента совпадает со значением, полученным из экспериментов по циклотронному резонансу.

Был вычислен фактор спектроскопического расщепления  $g$  по величине магнитного поля  $H^0$ , при котором наблюдается нулевой максимум поперечного магнетосопротивления в антимониде индия для концентрации электронов  $n \approx 6,7 \cdot 10^{15} \text{см}^{-3}$ .  $g$ -фактор оказался равным 65, вместо 56 для  $\text{InSb}$ . Такое расхождение, как показали теоретические расчеты, обусловлено температурным и столкновительными уширениями уровней Ферми и Ландау.

Влияние спинового расщепления уровней Ландау на поперечную и продольную магнетотермоэдс и на поле поперечного эффекта Нернста-Этингсгаузена было обнаружено нами в работе [4].

На электронном арсениде индия были измерены  $\frac{\rho}{\rho_0} \perp (H)$ ,  $\frac{\Delta\rho}{\rho} \parallel (H)$ ,  $\varepsilon_y(H)$ ,  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha_0} \perp (H)$ ,  $\frac{\Delta\alpha}{\alpha_0} \parallel (H)$  и  $Q_{\perp}(H)$ . Параметры измеренных образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2

№ образца	$n, \text{см}^{-3}$	$U, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$T, \text{К}$
31	$1,25 \cdot 10^{17}$	2300	4,2
178	$1,7 \cdot 10^{17}$	24000	4,2

Результаты измерения представлены на рис.4.

Гальваномагнитные эффекты измерялись при 4,2 К, а термомагнитные эффекты при 8 К на образцах №31 и №178 таблица 2.

Измерения проводились на стационарном электро-

## ВЛИЯНИЕ СПИНА НА ГАЛЬВАНО- И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

магните с напряженностью до 32 кЭ, используя для записи сигналов двух координатный самописец. Градиент температуры определялся с помощью угольного термометра сопротивления.

Как видно из рисунка, коэффициент поперечного эффекта Нернста-Этингсгаузена  $Q_{\perp}(H)$  и продольная магнетотермоэдс  $\Delta\alpha/\alpha_0 \parallel(H)$  осциллируют в фазе.

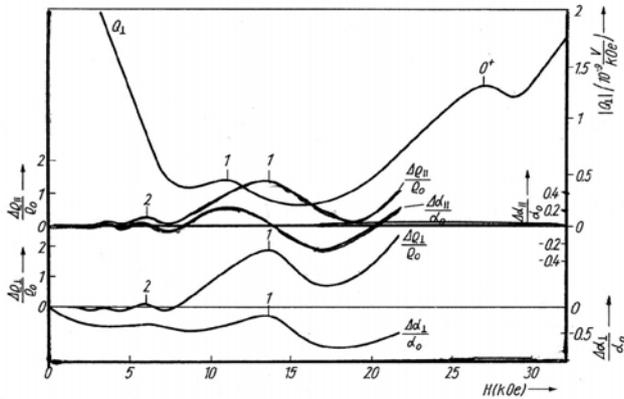


Рис.4

Поперечная термоэдс  $\Delta\alpha/\alpha_0 \perp(H)$ , поперечное  $\Delta\rho/\rho_0 \perp(H)$  и продольное  $\Delta\rho/\rho_0 \parallel(H)$  магнетосопротивление осциллируют в фазе и смещены на четверть периода по отношению к осцилляциям эффекта Нернста-Этингсгаузена и продольной магнетотермоэдс. Согласно теории обнаруженное смещение объясняется наличием фоновой доли термоэдс.

Впервые обнаружен нулевой максимум на кривой осцилляции эффекта Нернста-Этингсгаузена в магнитном поле 32 кЭ, обусловленный расщеплению нулевого уровня Ландау, так называемый  $0^+$  максимум.

В поперечном магнетосопротивлении  $0^+$  максимум для этого же образца арсенида индия наблюдается в поле 36 кЭ.

Работа по обнаружению влияния спинового расщепления уровней Ландау на магнетосопротивление (на ряде полупроводниковых соединений), выполненная группой сотрудников Института физики во главе с Х.И.Амирхановым (Баширов Р.И., Исмаилов З.А., Закиев Ю.Э., Гаджиалиев М.М., Моллаев А.Ю.), в 1995 году была удостоена Государственной премии Республики Дагестан по науке.

- [1]. Б.М.Аскеров. Электронные явления переноса в полупроводниках. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1985. С. 317.
- [2]. Х.И.Амирханов, Р.И.Баширов. Новые данные по спиновому эффекту Шубникова-де-Гааза в n-InSb. Письма в ЖЭТФ, **1**, 2, 17 (1965).
- [3]. Х.И.Амирханов, Р.И.Баширов, А.Ю.Моллаев. Маг-

- нетосопротивление n-GaAs в сильных магнитных полях, ФТП, **4**, 10, 1884 (1970).
- [4]. Kh.I.Amirkhanov, R.I.Bashirov, M.M.Gadzhialiev. Quantum oscillations of the Nernst-Ettingshausen effect in indium arsenide. Phys. Stat. Sol., **20**, p.119 (1967)

Received: 10.02.2007