

©1995 г.

МАГНИТОФОНОННЫЙ РЕЗОНАНС НА РАЗОГРЕТЫХ ЭЛЕКТРОНАХ В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ

Р.И.Баширов, Р.Р.Баширов, В.А.Елизаров

Институт физики им. Х.И.Амирханова,
Дагестанский научный центр Российской академии наук,
367003, Махачкала, Россия
(Получена 14 июня 1994 г. Принята к печати 6 марта 1995 г.)

Измерен магнитофононный резонанс на разогретых электронах в антимониде индия. Обнаружены новые осцилляционные пики, связанные с эмиссией двух поперечных акустических фононов с противоположно направленными волновыми векторами. Наблюдалось расщепление первых максимумов. При сильном разогреве наблюдались спин-магнитофонный резонанс и резонанс с испусканием двух оптических фононов.

Магнитофонный резонанс на горячих и разогретых электронах в антимониде индия при низких температурах экспериментально исследован в ряде работ [1-7]. В данной работе приводятся результаты исследований магнитофононного резонанса в антимониде индия на разогретых электронах. Измерялось продольное, поперечное магнитосопротивление и эффект Холла при 20 К и гелиевых (1.8-4.2 К) температурах в постоянных электрических полях. Проведены измерения на семи образцах, вырезанных из слитков различным образом. Кристаллографические направления не определялись. Образцы имели концентрации примесей $N_D - N_A$ при 77 К от 10^{14} см^{-3} до $1.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, подвижность электронов составляла от $5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ до $5.8 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Использовалась методика двойного дифференцирования с модуляцией стационарного магнитного поля переменным магнитным полем.

В отдельных случаях магнитофонные осцилляции измерялись в импульсных магнитных полях. Образцы размером $10 \times 1 \times 0.6 \text{ мм}^3$ погружались непосредственно в гелиевую или водородную ванны. При измерениях с удельными мощностями $0.3 \text{ Вт}/\text{см}^2$ в работе [1] не было обнаружено разогрева кристаллической решетки антимонида индия. Для разогрева электронного газа использовались значительно меньшие удельные мощности. При всех измеренных температурах осцилляции поперечного, продольного магнитосопротивления и эффекта Холла синфазны. Измерения проводились при постоянном токе через образец, при этом электрическое поле на образце изменяется

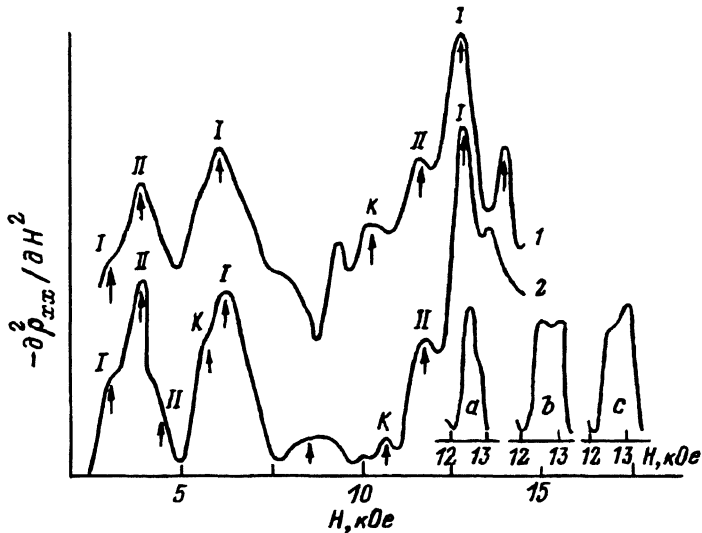


Рис. 1. Зависимость второй производной магнитосопротивления от магнитного поля ($\rho \perp H$) при малых постоянных электрических полях, $T = 4.2$ К. 1 — InSb, образец 1 с параметрами $\mu = 5 \cdot 10^5$ см²/В·с, $n = 1.6 \cdot 10^{14}$ см⁻³; 2 — InSb, образец 5 с параметрами $\mu = 5.8 \cdot 10^5$ см²/В·с, $n = 10^{14}$ см⁻³. На вставке показано расщепление пика AI при $E_0 = 0.3$ В/см и токах I, мА: a — 4.03, b — 4, c — 3.9.

при варьировании магнитного поля. При низких электрических полях ($E_0 = 0.1$ В/см) наблюдались все ранее [5-7] обнаруженные (рис. 1) осцилляционные максимумы, обусловленные переходом электронов между минимумами подзон Ландау, с испусканием двух поперечных акустических (ТА) фононов, с частотами, соответствующими особым точкам фононного спектра, и с противоположно направленными волновыми векторами.

Нами наблюдались обозначенные в [7] серии пиков I, II, K и новые пики при 14.1 и 8.6 кЭ. Известные серии I, II, K расположены при магнитных полях: I — 13.1, 6.5, 4.6, 3.15 кЭ, II — 12, 5.8, 4.1 кЭ, K — 10.6, 5.5, 3.5 кЭ. Кроме того, наблюдалось расщепление первых максимумов при определенных электрических полях. На вставке к рис. 1 показано расщепление первого максимума из серии I при $E_0 \simeq 0.3$ В/см. Теория [8] предсказывает пиннинг первого экстремума, возникающий при переходе электронов с уровня Ландау $N = 1$ на уровень $N = 0$ с испусканием оптического фонона. Для случая переходов с испусканием двух акустических фононов с противоположно направленными импульсами теория отсутствует.

По мере увеличения электрического поля ($E_0 = 0.2-0.6$ В/см) максимумы исчезают, за исключением первых, и возникают осцилляционные минимумы, связанные с переходами электронов между подзонами Ландау с испусканием продольных оптических фононов. Вблизи расчетных [9] резонансных значений магнитных полей ($E_N - E_{N'} = \hbar\omega_0$) появляются осцилляционные минимумы, которые хорошо совпадают с данными других работ и расположены при $H = 27, 15, 10.6, 8, 6.2, 5.15, 4.35, 3.64, 3.15, 2.9$ кЭ (рис. 2).

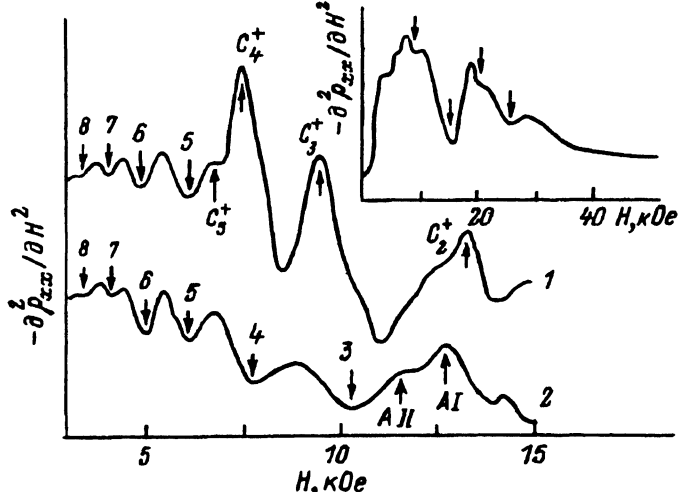


Рис. 2. Зависимость второй производной магнитосопротивления от магнитного поля для образца 1 при различных электрических полях, $T = 4.2$ К. 1 — $E_0 > 1.5$ В/см, 2 — $E_0 < 1.5$ В/см. На вставке — зависимость величины $\partial^2 \rho_{xx} / \partial H^2$ от магнитного поля, снятая в импульсном магнитном поле.

При сильном разогреве электронного газа ($E_0 > 1.5$ В/см) наблюдаются максимумы осцилляций при $H = 13.5, 9.65, 7.2, 5.85$ кЭ, по-видимому, связанные с переходами электронов (C_N^+) с переворотом спина с подуровней Ландау $2^- - 5^-$ на нижний уровень 0^+ . Это предположение подтверждается расчетом. Например, положения экстремумов, связанных с переворотом спина, располагаются при следующих расчетных магнитных полях: 13.7, 9.34, 7.03, 5.79 кЭ. Расчеты выполнялись по формуле

$$E_N = -\frac{E_g}{2} + \left(\frac{E_g}{4} + E_g \left[\left(N + \frac{1}{2} \right) \hbar\Omega + N|g|\mu_0 H \right] \right)^{1/2}$$

для значений E_N , приведенных в работе [9] для следующих зонных параметров антимонида индия; $E_g = 263.7$ мэВ, $m^* = 0.0139m_0$, $g = -51.3$, $\Delta = 0.810$ эВ. Здесь E_g — ширина запрещенной зоны, m^* — эффективная масса электрона, g — фактор спектроскопического расщепления, Δ — величина спин-орбитального расщепления, E_N — энергия электрона на N -м уровне Ландау. Для продольных оптических фононов в антимониде индия $\hbar\omega_0 = 23.9$ мэВ. Минимумы осцилляций поперечного и продольного магнитосопротивления при 20 и 15 кЭ мы объясняем испусканием двух оптических фононов при электронных переходах с 3 и 5 уровней на самый нижний, причем минимум 5/2 перекрывается вторым однофононным минимумом.

Появление осцилляционных минимумов вблизи точек магнитофононного резонанса без переворота спина электрона обосновано теорией и не свидетельствует о переходе электронов на донорный уровень, поскольку последний в InSb ниже 10 кЭ слит с зоной проводимости.

- [1] R.A. Stradling, R.A. Wood. Sol. St. Commun., **6**, 701 (1968).
- [2] М.М. Аксельрод, В.Г. Луговых, Р.В. Поморцев, И.М. Цидильковский. ФТТ, **11**, 113 (1969).
- [3] W. Racek, G. Bauer, H. Kahlert. Phys. Lev. Lett., **31**, 301 (1973).
- [4] W. Zawadzki, G. Bauer, W. Racek, H. Kahlert. Phys. Rev. Lett., **35**, 1098 (1975).
- [5] Р.И. Баширов, В.А. Елизаров. Тез. докл. Всес. конф. «Физика соединений А^{III}В^V» (Новосибирск, 1981).
- [6] Р.И. Баширов, В.А. Елизаров. В сб. *Электрические и оптические свойства полупроводников* (Махачкала, 1980).
- [7] М.Д. Бох, Л.И. Магарилл, В.И. Сапцов, Э.М. Скок. ФТТ, **28**, 1470 (1986).
- [8] А.А. Ключанов, В.Н. Гладилин. Тез. докл. XI совещ. по теории полупроводников (Ужгород, 1983).
- [9] E.J. Jonson, D.H. Dickey. Phys. Rev. B, **4**, 2676 (1970).

Редактор Т.А. Полянская

Magnetophonon resonance on heated electrons in indium antimonide

R.I.Bashirov, R.R.Bashirov, V.P.Yelizarov

Kh.I.Amirkhanov Institute of Physics, Russian Academy of Sciences, 367003 Makhachkala, Russia

Magnetron resonance on heated electrons in indium antimonide is measured. New oscillation peaks associated with emission of two transverse acoustic phonons having opposite wave vectors were found. Splitting of the first maximums was observed. Spin-magnetophonon resonance as well as a resonance with emitting two optical phonons were observed under stronger heating.

