

АНИЗОТРОПИЯ  $g$ -ФАКТОРА ЭЛЕКТРОНОВ В ЗОНЕ ПРОВДИМОСТИ  $\text{InSb}$ 

А.В.Вдовин, Э.М.Скок, Е.И.Уваров

Впервые измерена анизотропная поправка к  $g$ -фактору свободных электронов антимонида индия. Ее максимальное значение  $\Delta g = g(H \parallel [100]) - g(H \parallel [111])$  равно  $0,090 \pm 0,004$  при магнитном поле  $H = 9434$  Гс. Это позволило определить матричный элемент взаимодействия валентной зоны  $V$  с верхней зоной проводимости  $C'$ , лежащей выше обычной  $C$  на  $3,5$  эВ.

Известная трехзонная модель зонной структуры антимонида индия <sup>1</sup> дает изотропный закон дисперсии, а следовательно, изотропный  $g$ -фактор для самой нижней зоны проводимости  $C$ . Это обусловлено тем, что такая модель ограничивается рассмотрением взаимодействия зоны  $C$  по теории  $kp$ -возмущения до  $k^2$  включительно, но только с двумя валентными зонами легких дырок  $V$ . Учет влияния более удаленных зон, и в первую очередь ближайшей из них  $C'$  ( $E_{C'} - E_C = 3,5$  эВ) в следующем порядке (до  $k^4$ ) дает поправки к  $g$ -фактору, зависящие от ориентации кристалла относительно магнитного поля <sup>2</sup>. Попытка экспериментального определения величины анизотропной поправки к  $g$ -фактору в работе <sup>3</sup> не дала надежных результатов.

Применение метода усиления при вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР-усиление) позволило нам не только измерить максимальное значение поправки, но изучить ориентационную зависимость  $g$ -фактора при вращении кристалла вокруг кристаллографического направления  $[110]$ , перпендикулярного магнитному полю. В основе метода <sup>4</sup> лежит явление резонансного возрастания интенсивности тестовой волны с частотой  $\nu_2/c = 1821,0361$  см<sup>-1</sup> за счет перекачки энергии из мощной волны с  $\nu_1/c = 1842,8210$  см<sup>-1</sup> в момент совпадения разности энергии квантов с величиной спинового расщепления уровня Ландау при сканировании магнитного поля, т. е.

$$\hbar\omega_1 - \hbar\omega_2 = g^* \mu_B H_0, \quad (1)$$

где  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $g^*$  — измеряемый  $g$ -фактор,  $\omega_{1,2} = 2\pi\nu_{1,2}$ . Из рис. 1, поясняющего методику и геометрию эксперимента, видно, что лучи двух лазеров (лазеры на окиси углерода) пространственно совмещались и фокусировались на входную грань ориентированных кристаллов. Измерение проводилось на двух образцах с концентрацией свободных носителей  $n_e = 8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> и  $n_e = 3,8 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Резонанс регистрировался по изменению интенсивности волны с частотой  $\omega_2$ . При этом применялась модуляция магнитного поля и синхронное детектирование. Для указанных частот излучения и при  $H \parallel [111]$  резонанс (1) наблюдался в поле  $H_0 = 9434$  Гс.  $g$ -фактор, согласно этой формуле, составлял 49,46. Отклонение  $g$ -фактора от этого значения при вращении образца на  $360^\circ$  вокруг направления  $[110]$  показано точками на рис. 2 и повторялось на обоих образцах. Максимальное отклонение соответствует  $H \parallel [100]$  и равно  $0,090 \pm 0,004$ . При  $H \parallel [110]$  имеется локальный максимум, который составляет  $\Delta g_{110} = g[110] - g[111] = 0,022 \pm 0,004$ .

Вдоль четырех эквивалентных направлений  $[111]$  наблюдаются провалы до нуля. Сплошной линией показана теоретическая кривая, описываемая формулой <sup>2</sup>:

$$\Delta g = g(\theta) - g[111] = \gamma_0 \left[ 1 - \frac{3}{4} \sin^2 \theta (1 + 3 \cos^2 \theta) \right], \quad (2)$$

$$\gamma_0 = \frac{2}{3} \frac{\mu_B H}{E_g} \frac{\mathcal{E}_P}{E_g} \frac{\mathcal{E}_Q}{E'_g}, \quad \mathcal{E}_P = \frac{2|P|^2}{m}, \quad \mathcal{E}_Q = \frac{2|Q|^2}{m}, \quad E_g = E_C - E_V, \quad E'_g =$$

$= E_{C'} - E_V$ , а  $P$  и  $Q$  матричные элементы импульса между состояниями  $V-C$  и  $V-C'$  соответственно. Угол  $\theta$  на рис. 2 сдвинут относительно  $\theta$  в формуле (2) на  $2\pi/3$ .

Параметр  $\gamma_0$  получался подгонкой теоретической кривой к экспериментальным данным методом наименьших квадратов. Поскольку точность ориентации образцов ограничивалась  $5^\circ$ , то при подгонке варьировалось и начало отсчета угла  $\theta$  (сдвиг картинка вдоль оси абсцисс). Среднеквадратичная величина разброса экспериментальных данных по обоим образцам составляла 0,004. Как следует из (2) величина анизотропии  $\gamma_0$  линейно зависит от магнитного поля и стремится к нулю при  $H \rightarrow 0$ . Тангенс угла наклона прямой  $\gamma_0/H = 9,5 \cdot 10^{-3}$  1/кГс. Для  $\mathcal{E}_P = 23,42$  эВ,  $E'_g = 0,2368$  эВ<sup>5</sup>,  $H = 9,434$  кГс,  $\gamma_0 = 0,09$  из выражения для  $\gamma_0$  в (2) находим:  $\mathcal{E}_Q/E'_g = 5,92$ . Для сравнения  $\mathcal{E}_P/E_g = 98,9$ . Если взять  $E'_g = 3,7$  эВ<sup>6</sup>, то получим для  $\mathcal{E}_Q = 21,9$  эВ. Сравнивая  $\mathcal{E}_Q$  с  $\mathcal{E}_P$ , видим, что величина квадрата матричного элемента  $|Q|^2$  не намного отличается от  $|P|^2$ , а малость влияния зоны  $C'$  на  $C$  по сравнению с влиянием зоны  $V$  обусловлена удаленностью  $C'$ . Для относительной величины поправки в гамильтониане получаем  $\Delta g \mu_B H \sigma / \frac{1}{2} g \mu_B H \sigma = 0,38\%$  (для поля 9,4 кГс), что в пересчете на 100 кГс даст величину 4%, согласующуюся с оценкой работы<sup>2</sup>.

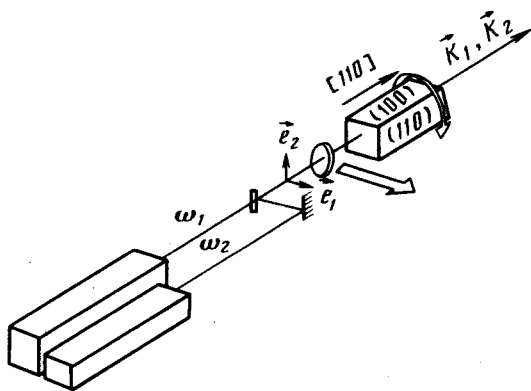


Рис. 1. Схема эксперимента.  $\omega_1$ ,  $e_1$ ,  $k_1$  и  $\omega_2$ ,  $e_2$ ,  $k_2$  — частоты, поляризации и волновые вектора излучения мощного лазера и тестового соответственно.

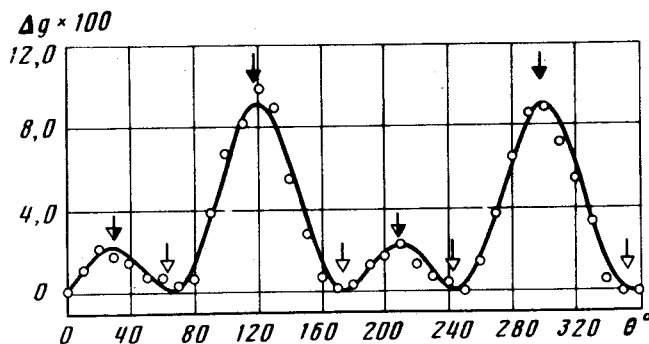


Рис. 2. Анизотропия  $g$ -фактора электронов проводимости  $n$ -InSb.  $\Delta g = g(\theta) - g[111]$ . Треугольники указывают углы совпадения направления магнитного поля с кристаллографическими направлениями:  $\nabla$  —  $H \parallel [111]$ ;  $\nabla$  —  $H \parallel [110]$ ;  $\nabla$  —  $H \parallel [100]$

Следует отметить, что приведенные экспериментальные данные показывают уникальные возможности метода ВКР-усиления по чувствительности и точности измерения  $g$ -фактора. Так максимальное значение  $\Delta g$  на рисунке 2 составляет 0,18% от абсолютного значения  $g$ -фактора. А среднеквадратичное значение ошибки 0,008%.

Авторы благодарят С.А.Студеникина и И.В.Вдовина за помощь в проведении экспериментов.

#### Литература

1. Bowers R., Yafet Y. Phys. Rev., 1959, 115, 1165.
2. Ogg N.R. Proc. Phys. Soc., 1966, 89, 431.
3. Mc Combe B.D. Solid State Comm., 1968, 6, 533.
4. Вдовин А.В., Скок Э.М. ФТП, 1981, 15, 1078.
5. Efros A.I., Kanskaya L.M., Kokhanovskii S.I., Seisyan R.P. Phys. Stat. Sol. (b), 1982, 114, 373.
6. Cohen M., Bergstresser T. Phys. Rev., 1966, 141, 789.