

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ЖУРНАЛ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ

Том 69

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТISК)

12

МОСКВА · 1975

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТНЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО КОНДЕНСАТА В ЧИСТОМ Ge

П. С. Гладков, К. Бетцлер¹⁾, Б. Г. Журкин,
А. Л. Карузский

Исследованы магнитные осцилляции интенсивности в различных точках линии люминесценции ($LA-709$ мэв) из ЭДК в чистом Ge. Полученная спектральная картина осцилляций объясняется в рамках «капельной» модели. Из осцилляций интенсивности в трех точках линии вычислены магнитные осцилляции спектральной ширины линии и характеристических энергий ЭДК (химического потенциала, кинетической, обменной и корреляционной энергий на пару частиц в ЭДК).

Одним из способов экспериментального исследования свойств электронно-дырочного конденсата (ЭДК) в полупроводниках [1-3] является воздействие сильного магнитного поля на ЭДК. Как показали Келдыш и Сидли [4], в магнитном поле возникает осциллирующая добавка к равновесной плотности носителей заряда в электронно-дырочной ферми-жидкости, которая вызывает осцилляции интенсивности излучательной рекомбинации (ИР) ЭДК. Осцилляции интенсивности интегральной (по спектру) ИР из ЭДК в чистом германии наблюдались ранее [5, 6].

В настоящей работе исследовались магнитные осцилляции интенсивности ИР в различных точках спектра излучения ЭДК. На основе полученных экспериментальных данных вычислены зависимости спектральной ширины линии ИР и характеристических энергий ЭДК в чистом Ge от магнитного поля.

Известно, что из формы и спектральной позиции линий люминесценции из ЭДК в отсутствие магнитного поля можно определить характеристические энергии ЭДК: энергию Ферми, энергию связи и т. п. [2, 7, 8]. При температуре $T \rightarrow 0$ К. т. е. когда температурным размытием уровня Ферми можно пренебречь, химический потенциал в ЭДК, равный средней энергии на пару частиц $\langle E_n \rangle$, определяется коротковолновой границей E_h линии ИР ЭДК [7, 8]. Полная спектральная ширина линии ΔE равна сумме энергий Ферми электронов и дырок $E_F = E_F^e + E_F^h$ [2, 8]. Из соотношения

$$\langle E_n \rangle = E_0 + \langle E_{kin} \rangle, \quad (1)$$

где $E_0 = E_{ex} + E_{cor}$ — сумма средних обменной и корреляционной энергий и $\langle E_{kin} \rangle$ — средняя кинетическая энергия на пару частиц в ЭДК, используя известное выражение $\langle E_{kin} \rangle = \frac{3}{2} E_F$, можно получить энергию E_0 , определяющую ширину запрещенной зоны в ЭДК. Воздействие квантуемого магнитного поля усложняет определение характеристических энергий ЭДК.

Опыты проводились при $T = 1,5$ К на образцах чистого Ge с концентрацией примесей $\approx 10^{12}$ см⁻³ при наложении магнитного поля $H = 0 \div 32$ кэ, создаваемого сверхпроводящим соленоидом. Поле H было параллельно

¹⁾ Прикомандирован из Физического института университета в г. Штутгарте, ФРГ.

кристаллографической оси [100] образцов. Неравновесные носители возбуждались GaAs-лазером, который генерировал импульсы длительностью 2 мксек при скважности 0,2%. Световой поток на образец ≈ 5 вт/см². Детали экспериментальной установки описаны в [6, 9]. Спектральная ширина щели ~ 1 мэв.

Исследовались осцилляции интенсивности люминесценции в максимуме и по краям линии ИР с испусканием LA-фона (709 мэв) в зависимости от времени задержки регистрации после импульса возбуждения t . Оказалось, что при достаточно малых задержках ($t \leq 10$ мксек) относительная амплитуда осцилляций интенсивности (т. е. нормированная на величину интенсивности в нулевом магнитном поле $H=0$) минимальна в центре линии и увеличивается к краям. На рис. 1 показаны осцилляции в трех точках линии LA—709 мэв при $t=7$ мксек. Видно, что осцилляции в максимуме линии значительно меньше осцилляций по краям. Это объясняется тем, что, по данным работ [6, 9], при $t \rightarrow 0$ относительные амплитуды осцилляций интенсивности интегральной ИР и спектральной ширины линии ИР можно считать равными амплитуде осцилляций плотности носителей в ЭДК. Но интенсивность интегральной ИР равна площади под кривой спектральной зависимости ИР ЭДК, т. е. может быть с достаточной точностью представлена в виде произведения спектральной ширины на интенсивность в максимуме линии. Поэтому интенсивность в максимуме должна осциллировать слабо при малых t . При увеличении времени задержки амплитуда осцилляций интенсивности в любой точке спектра меняется линейно со временем t , т. е. обнаруживает зависимость, аналогичную описанной в работе [6] для интенсивности интегральной ИР.

Как следует из данных работ [9, 10], в полях $H \leq 25$ кэ форма линии LA—709 мэв меняется незначительно, тогда как в более сильных полях начинает сказываться расщепление этой линии [10] ²⁾. Поэтому, предполагая форму линии неизменной при $H \leq 25$ кэ, можно рассчитать спектральное положение линии в этой области полей, используя осцилляции интенсивности в трех точках спектра. Действительно, интенсивность в любой точке линии $I(E)$ можно представить как функцию от крайней коротковолновой E_h , крайней длинноволновой E_l точек линии и максимальной интенсивности I_{max} :

$$I(E) = f(E_h, E_l, I_{max}).$$

E_h определяется как коротковолновая граница линии при $T \rightarrow 0$ К [7]. Используя осцилляции интенсивности в центре и в двух точках на краях линии (рис. 1), мы вычислили осцилляции E_h и E_l в магнитном поле. На рис. 2, а, б приведены результаты расчета для E_h и ширины линии $\Delta E = E_h - E_l$. Зависимость E_h от H определяет осцилляции средней энергии $\langle E_n \rangle$ на пару частиц в ЭДК (т. е. химический потенциал) в магнитном поле.

Осцилляции ΔE характеризуют поведение энергии Ферми в магнитном поле и хорошо согласуются с результатами нашей предыдущей работы [9]. Пренебрегая квантованием дырок в полях $H < 25$ кэ [4, 5, 9] и используя выражения из [9], можно получить связь между энергией Ферми и средней кинетической энергией в магнитном поле для ЭДК:

$$\langle E_{kin} \rangle = \langle E_{kin} \rangle + \langle E_{kin}^A \rangle = \varepsilon_F^e \sum_{n=0}^{n_{max}(e)} \sum_{s=0}^4 \left[\frac{1}{3} (1-nx-sy)^{3/2} + \right.$$

²⁾ В наших экспериментах расщепление линии LA—709 мэв наблюдалось при $H > 25$ кэ, т. е. в полях, более слабых, чем те, о которых сообщалось Алексеевым и др. [10] ($H > 10$ кэ).

$$+ \left(nx + sy + \frac{x+y}{2} \right) (1 - nx - sy)^{1/2} \Big] / \sum_{n=0}^{n_{\max}(s)} \sum_{s=0}^1 (1 - nx - sy)^{1/2} + \frac{3}{5} \epsilon_F^h, \quad (2)$$

где $x = \hbar\omega/\epsilon_F^e$; $y = \hbar\omega_s/\epsilon_F^e$; ϵ_F^e и ϵ_F^h — энергии Ферми электронов и дырок, отсчитываемые от нижних уровней Ландау; ω — циклотронная частота электронов для данного направления H ; $\omega_s = m_i\omega/m_s$; m_i — циклотронная эффективная масса электрона; $m_s = 2m_i/g_i$; m_0 — масса свободного электрона; g_i — g -фактор электрона для данного направления.

Из (2), полагая $\epsilon_F^e \approx 0,4\Delta E$, $\epsilon_F^h \approx 0,6\Delta E$ [6], вычислим осцилляции $\langle E_{kin} \rangle$ и, подставляя в (1), получим осцилляции энергии $E_0 = E_{ex} + E_{cor}$ (рис. 2, в, з). Сложный характер этих осцилляций связан с тем, что на $\langle E_{kin} \rangle$ и E_0 одновременно действуют перераспределение плотности состояний по энергиям из-за движения уровней Ландау в магнитном поле и осцилляции равновесной плотности носителей. Это также следует из результатов работы Келдыша и Сплена [4], в которой показано, что фазы осцилляций кинетической, обменной энергии и плотности носителей в ЭДК в магнитном поле не совпадают. По порядку величины осцилляции E_0 согласуются с их оценками [4] ($\sim 3\%$ от энергии связи ЭДК $\approx 2,5$ мэв при $H = 10$ кэ).

Ранее спектральные исследования осцилляций интенсивности ИР ЭДК были проведены в Si [11], где также было обнаружено, что амплитуда осцилляций в центре линии меньше, чем на коротковолновом краю.

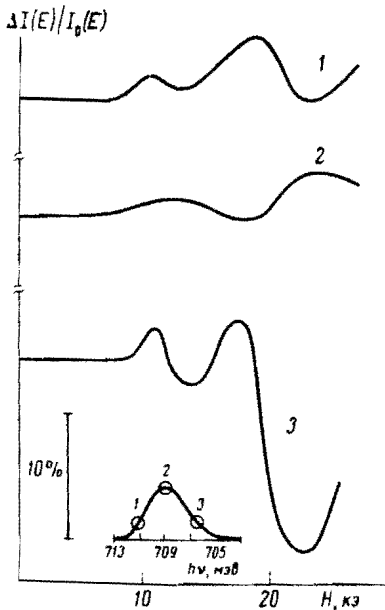


Рис. 1

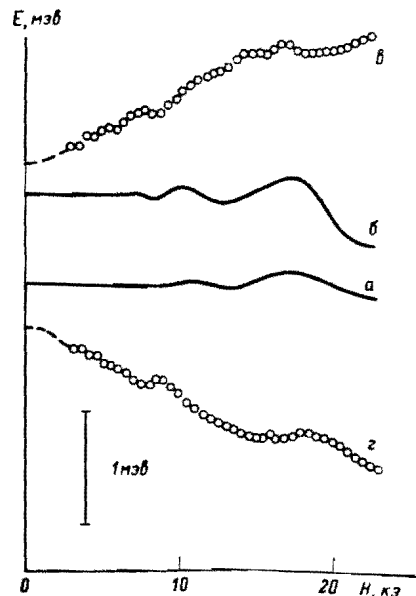


Рис. 2

Рис. 1. Магнитные осцилляции интенсивности люминесценции из ЭДК в чистом Ge в различных точках спектра. $T = 1,5$ К. Кривые 1, 2, 3 соответствуют точкам, указанным на спектральной линии. Время задержки регистрации после возбуждающего импульса 7 мксек. Погрешность измерений $\pm 1,5\%$

Рис. 2. Магнитные осцилляции характеристических энергий ЭДК в чистом Ge ($T = 1,5$ К): а — осцилляции средней энергии на пару частиц (E_n); б — осцилляции ширины линии LA-709 мэв ΔE ; в — осцилляции средней кинетической энергии на пару частиц ($\langle E_{kin} \rangle$); з — осцилляции обменной и корреляционной энергий $E_0 = E_{ex} + E_{cor}$. Точками показаны данные расчета по формуле (2)

Итак, нами исследованы магнитные осцилляции интенсивности излучения в различных точках линии люминесценции ЭДК в чистом Ge. Полученные результаты хорошо объясняются в рамках «капельной» модели. Из осциллирующей интенсивности в трех точках линии рассчитаны магнитные осцилляции спектральной ширины линии и характеристических энергий ЭДК.

В заключение авторы благодарят Л. В. Келдыша и А. П. Силина за обсуждение результатов, Н. Б. Волкова и В. С. Бородачеву за помощь в расчетах на ЭВМ.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
17 июня 1975 г.

Литература

- [1] Л. В. Келдыш. Proc. IX Intern. Conf. Phys. Sem., Moscow, 1968, стр. 1303.
- [2] Ya. Pokrovskii. Phys. Stat. Sol. (a), **11**, 385, 1972. (см. там же ссылки на литературу).
- [3] M. Voos. Proc. XII Intern. Conf. Phys. Sem., Stuttgart, 1974, стр. 33 (см. там же ссылки на литературу).
- [4] Л. В. Келдыш, А. П. Силин. ФТТ, **15**, 1532, 1973.
- [5] В. С. Багаев, Т. И. Галкина, Н. А. Пенни, В. Б. Стопачинский, М. Н. Чураева. Письма в ЖЭТФ, **16**, 120, 1972.
- [6] К. Бетцлер, Б. Г. Журкин, А. Л. Карузский. Solid State Comm., **17**, 577, 1975.
- [7] C. Benoit a la Gaillaume, M. Voos. Phys. Rev., **7**, 1723, 1973.
- [8] Thomas K. Lo. Solid State Comm., **15**, 1231, 1974.
- [9] А. Л. Карузский, К. В. Бетцлер, Б. Г. Журкин, Б. М. Балтер. ЖЭТФ, **69**, 1088, 1975.
- [10] А. С. Алексеев, В. С. Багаев, Т. И. Галкина, О. В. Гоголин, Н. А. Пенни, А. Н. Семенов, В. Б. Стопачинский. Письма в ЖЭТФ, **12**, 203, 1970.
- [11] А. Ф. Дите, В. Т. Лысенко, В. Д. Лохненко, В. Б. Тимофеев. Письма в ЖЭТФ, **18**, 114, 1973.

SPECTRAL DEPENDENCE OF THE MAGNETIC OSCILLATIONS OF LUMINESCENCE INTENSITY OF AN ELECTRON-HOLE CONDENSATE IN PURE Ge

P. S. Gladkov, K. Betzler, B. G. Zhurkin, A. L. Karuzsky

Magnetic oscillations of the intensity at different points in the luminescence line (LA-709 meV) from an electron-hole condensate (EHC) in pure Ge are investigated. The spectral pattern of the oscillations is explained within the framework of the «drop» model. Magnetic oscillations of spectral width of the line and of the characteristic energies of the EHC (chemical potential, kinetic, exchange and correlation energies per pair EHC particles) are determined on basis of oscillations of the intensity at three points.