

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ЖУРНАЛ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ

Том 69

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТІСЪ)

9

МОСКВА · 1975

МАГНИТНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ПОЛУШИРИНЫ ЛИНИИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЕЛЬ В ЧИСТОМ ГЕРМАНИИ

А. Л. Каруцкий, К. В. Беццлер¹⁾, В. Г. Журкин,
Б. М. Балгер

Экспериментально наблюдались магнитные осцилляции полуширины линии излучательной рекомбинации электронно-дырочных капель в германии (линия LA—709 мкэв). Показано, что наблюдаемые осцилляции можно объяснить с помощью осцилляций плотности носителей заряда ρ_n в каплях. Выведено соотношение между dE_F/E_F и $d\rho_n/\rho_n$, на основе которого с учетом осцилляций ρ_n была вычислена зависимость полуширины линии ΔE от магнитного поля. Расчетная кривая хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Как было экспериментально обнаружено [1], полная интенсивность рекомбинационного излучения из электронно-дырочных капель (ЭДК) в германии осциллирует в магнитном поле. Келдыш и Силян [2] показали, что при наложении магнитного поля появляются осциллирующие добавки к свободной энергии и к равновесной плотности носителей заряда в ЭДК. В работах [3, 4] применялись импульсное возбуждение и импульсная регистрация сигнала интегральной (по спектру) излучательной рекомбинации (ИИР) в германии, что позволило исследовать кинетику осцилляций ИИР, определить осцилляции равновесной плотности носителей заряда ρ_n в ЭДК в магнитном поле, а также получить оценку величины квантового выхода.

Известно, что в отсутствие магнитного поля форма спектральной линии излучательной рекомбинации ЭДК связана с энергией Ферми: $E_F \propto \rho_n^{1/3}$, откуда следует возможность оценки плотности носителей из формы линии [5]. При наложении магнитного поля связь между E_F и ρ_n усложняется, поэтому представляло интерес провести исследование формы линии ЭДК в зависимости от магнитного поля.

В настоящей работе экспериментально изучалась форма линии излучательной рекомбинации ЭДК с испусканием LA-фона (709 мкэв) в магнитных полях до 32 кэ. Опыты проводились на образцах чистого германия *n*-типа ($N_D \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$) размерами $5 \times 5 \times 0,3 \text{ мм}^3$, помещаемых в сверхпроводящий соленоид при температуре жидкого гелия $T = 1,5 \text{ К}$. Магнитное поле было параллельно кристаллографической оси [100] образцов. Неравновесные носители заряда генерировались с помощью импульсного GaAs-лазера мощностью $\sim 10 \text{ вт}$ в импульсе длительностью 2 мксек с частотой повторения импульсов 1 кГц. Во избежание перегрева мощность лазера распределялась примерно по всей поверхности образцов ($\approx 0,2 \text{ см}^2$). Излучение из образцов анализировалось с помощью монохроматора МДР-2 и регистрировалось импульсным германиевым фотодиодом со временем срабатывания $\sim 1 \text{ мксек}$. Для увеличения отношения сигнал/шум исполь-

¹⁾ Прикомандирован из физического института университета г. Штуттгарт, ФРГ.

звалась техника стробирующего интегрирования с длительностью строб-импульса 2 мксек.

На рисунке показаны экспериментальные результаты по зависимости полуширины линии $LA-709$ мэв, т. е. спектральной ширины линии, измеренной на уровне 0.5 от максимальной интенсивности I_{max} . Обнаружен осцилляционный эффект: полуширина линии излучательной рекомбинации ЭДК (линия $LA-709$ мэв) осциллирует в магнитном поле. Измерения проводились при времени задержки между импульсом возбуждения и моментом регистрации $t=10$ мксек. Как было показано в работе [4], при таком времени задержки интенсивность линии излучательной рекомбинации максимальна и слабо осциллирует в магнитном поле.

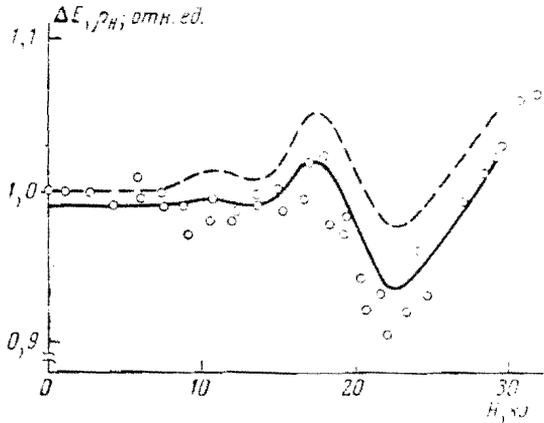
При нулевой температуре и в отсутствие магнитного поля полная спектральная ширина линии излучательной рекомбинации ЭДК равна сумме энергий Ферми для электронов и дырок ($E_F^e + E_F^h$). При наложении магнитного поля полная ширина линии будет определяться суммой энергетических промежутков между уровнем Ферми и соответствующим низшим уровнем Ландау для электронов и дырок. Так как при наших экспериментальных условиях $kT \ll E_F$, то можно пренебречь температурным размыванием уровня Ферми.

Проанализируем зависимость энергии Ферми в магнитном поле от плотности носителей заряда. Согласно Келдышу и Сплину [2], основной вклад в осцилляции в области магнитных полей, рассматриваемой в данной работе, должен быть обусловлен электронами, а вкладом дырок можно пренебречь; это следует также из анизотропной зависимости осцилляций [1] от направления магнитного поля H относительно кристаллографических осей. Доминирующий вклад электронов в осцилляции связан с тем, что для одних и тех же полей до 30 кэ дырки имеют большее число уровней Ландау, чем электроны, и поэтому они дают малый вклад в осцилляции ЭДК [6]. Можно считать, что для дырок в этой области полей справедливо выражение

$$\frac{dE_F^h}{E_F^h} / \frac{d\rho_H}{\rho_H} \approx \frac{2}{3}. \quad (1)$$

Рассмотрим систему электронов в ЭДК. Плотность состояний для электронов в магнитном поле $\nu_H(E, s)$ для случая η анизотропных долин [7] можно записать в виде [8]

$$\nu_H(E, s) = \sum_{i=1}^{\eta} \frac{\hbar \omega_i m^{3/2}}{2\sqrt{2} \pi^2 \hbar^3} \sum_{s=\pm 1} \sum_{n=0}^{n_{max}(s)} [E - (n+1/2) \hbar \omega_i - 1/2 g_i s \mu_B H]^{-1/2}, \quad (2)$$



Зависимость полуширины линии излучательной рекомбинации ЭДК (линия $LA-709$ мэв) и равновесной плотности носителей в ЭДК от магнитного поля; точки — экспериментальные, сплошная кривая — расчетная кривая полуширины, пунктир — плотность носителей в ЭДК [4]

где $\mu_B = eh/m_0c$ — магнетон Бора; m_0 — масса свободного электрона, m — масса плотности состояний; $\omega_i = eH/m_0c$, m_i и g_i — циклотронная частота, циклотронная масса и g -фактор электронов в i -й долине для данного направления магнитного поля; s — спиновое число, n — номер уровня Ландау, E — энергия.

Для направления магнитного поля вдоль оси [100] все четыре долины эквивалентны. Так как $g_i \approx 1,7$ [2], то для случая $n \geq 1$ пренебрегаем спиновым расщеплением. Вводя новые обозначения,

$$\mathcal{E}_F^e = E_F^e - \hbar\omega_i/2, \quad x = \hbar\omega_i/\mathcal{E}_F^e, \quad (3)$$

получим выражение для плотности носителей заряда ρ_H в ЭДК в магнитном поле:

$$\rho_H = \frac{4 \cdot 2^{1/2} m^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} x (\mathcal{E}_F^e)^{3/2} \sum_{n=0}^{n_{\max}} (1-nx)^{1/2}. \quad (4)$$

Далее получаем выражение для отношения логарифмических производных \mathcal{E}_F^e и ρ_H :

$$\frac{d\mathcal{E}_F^e}{\mathcal{E}_F^e} / \frac{d\rho_H}{\rho_H} = 2 \sum_{n=0}^{n_{\max}} (1-nx)^{1/2} / \sum_{n=0}^{n_{\max}} \frac{1}{(1-nx)^{1/2}}. \quad (5)$$

Как следует из выражения (5), при пересечении n -го уровня Ландау с уровнем Ферми ($nx=1$) положение уровня Ферми не зависит от плотности, а определяется положением этого уровня Ландау. Полуширина линии излучательной рекомбинации ЭДК в магнитном поле ΔE пропорциональна величине $\mathcal{E}_F^e + \mathcal{E}_F^h$. Используя соотношения (1) и (5), можно получить выражение для логарифмической производной полуширины линии в зависимости от плотности ρ_H в магнитном поле:

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta E)}{\Delta E} = & \left\{ \frac{\mathcal{E}_F^e}{\mathcal{E}_F^e + \mathcal{E}_F^h} \cdot 2 \sum_{n=0}^{n_{\max}} (1-nx)^{1/2} / \sum_{n=0}^{n_{\max}} \frac{1}{(1-nx)^{1/2}} + \right. \\ & \left. + \frac{\mathcal{E}_F^h}{\mathcal{E}_F^e + \mathcal{E}_F^h} \cdot \frac{2}{3} \right\} \frac{d\rho_H}{\rho_H} \quad (6) \end{aligned}$$

Из соотношения (6) и экспериментальных данных для осцилляций плотности носителей в ЭДК в магнитном поле [4] были вычислены методом итераций осцилляции полуширины линии излучательной рекомбинации ЭДК. Для полей, в которых $n=0$, учитывалось спиновое расщепление последнего электронного уровня Ландау. Расчет производился по формуле (6), но вместо m_i подставлялась спиновая масса $m_s = 2m_0/g_i$. На рисунке показаны зависимость ρ_H от магнитного поля [4] и вычисленная на основе ее зависимость полуширины линии ΔE от H для $m/m_0 = 0,22/0,13$ [2]. Кружками изображены экспериментальные точки зависимости полуширины линии LA-709 мэв от магнитного поля. Из сравнения видно, что характер осцилляций ΔE хорошо описывается расчетной кривой.

Авторы выражают благодарность Л. В. Келдышу и А. П. Спину за полезные дискуссии.

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

Поступила в редакцию
15 апреля 1975 г.

² Осцилляции спектральной ширины линии, измеренной на уровне $0,25/m_{\max}$, имеют такую же относительную величину, как и осцилляции полуширины линии. Поэтому можно считать, что осцилляции полуширины эквивалентны осцилляциям полной спектральной ширины линии.

Литература

- [1] В. С. Багаев, Т. И. Галкина, Н. А. Пенин, В. Б. Стопачинский, М. Н. Чураева. Письма в ЖЭТФ, 16, 120, 1972.
- [2] Л. В. Келдыш, А. П. Сялин. ФТТ, 15, 1532, 1973.
- [3] В. Б. Гиподман, П. С. Гладков, Б. Г. Журкин, Н. А. Казаков, Н. А. Пенин. Препринт ФИАН СССР, № 90, 1974.
- [4] К. В. Бетцлер, Б. Г. Журкин, А. Л. Карузский. Solid State Comm., в печати.
- [5] Thomas K. Lo. Solid State Comm., 15, 1231, 1974. Gordon A. Thomas, T. M. Rice, J. C. Hensel. Phys. Rev. Lett., 33, 219, 1974. Ja. E. Pokrovsky. Phys. Stat. Sol. (a), 11, 385, 1972. R. W. Martin, R. Sauer. Phys. Stat. Sol. (b), 62, 443, 1974.
- [6] А. С. Алексеев, В. С. Багаев, Т. И. Галкина, О. В. Гоголин, Н. А. Пенин, А. Н. Семенов, В. Б. Стопачинский. Письма в ЖЭТФ, 12, 203, 1970; Труды ФИАН СССР, 67, 109, 1973.
- [7] M. Blackman. Proc. Roy. Soc., 116, 1, 1938.
- [8] Н. Б. Брандт, С. М. Чудинюв. Электронная структура металлов, Из-во МГУ, 1973, стр. 189. Б. М. Аскеров. Кинетические эффекты в полупроводниках, «Наука», 1970, стр. 175.

MAGNETIC OSCILLATIONS OF THE LUMINESCENCE LINE
HALF-WIDTH OF ELECTRON-HOLE DROPS
IN PURE GERMANIUM

A. L. Karuzsky, K. W. Betzler, B. G. Zhurkin, B. M. Balter

Magnetic oscillations of the radiative recombination line half-width is experimentally observed for electron-hole drops in germanium (LA line, 709 meV). It is shown that the oscillations observed may be explained by invoking oscillations of the density of charge carriers ρ_H in the drops. A relation between dE_F/E_F and $d\rho_H/\rho_H$ is derived on basis of which (with allowance for oscillations of ρ_H) the dependence of the line half-width ΔE on magnetic field strength is calculated. The calculated curve is in good agreement with the experimental data.