

ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ
В НЕОДНОРОДНО ДЕФОРМИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ

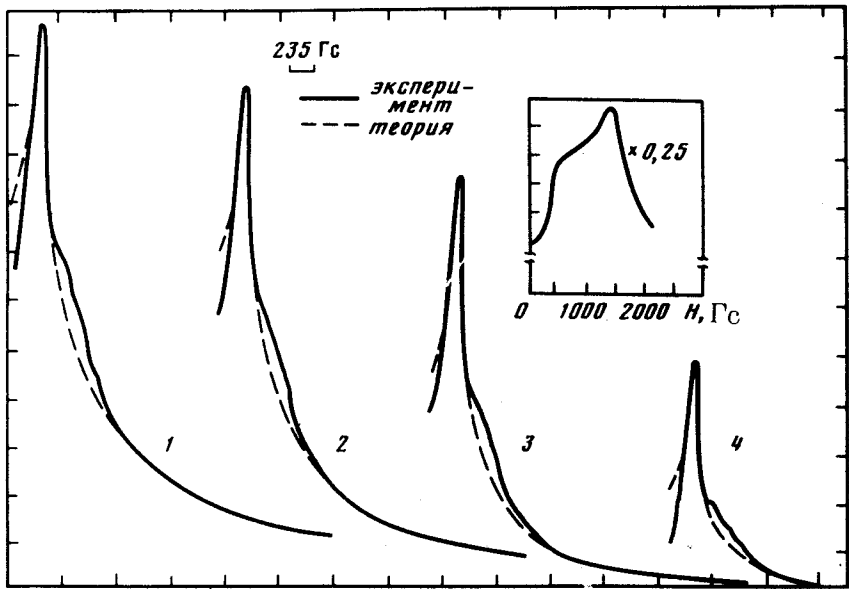
*А.Г.Макаров, А.А.Маненков, Г.Н.Михайлов,
А.С.Сеферов*

По форме линии циклотронного резонанса при $T = 4,2$ К в неоднородно деформированном Ge обнаружено неоднородное распределение свободных носителей над электронно-дырочной каплей, локализованной в потенциальной яме. Из анализа этой формы определены равновесная концентрация свободных носителей и частота столкновений вблизи поверхности капли. Приводятся оценки эффективного слоя свободных носителей, окружающих каплю.

Исследование циклотронного резонанса (ЦР) неоднородно деформированного Ge при импульсном лазерном возбуждении было предпринято нами в связи с проблемой больших электронно-дырочных капель (БЭДК). Если физические свойства самих капель изучены достаточно полно [1], то сведений о свойствах окружающего каплю облака свободных экситонов (СЭ) и свободных носителей (СН) до сих пор мало [2]. В то же время очевидно, что и пространственные, и кинетические особенности этого облака должны существенно влиять на поведение всей системы в целом.

Анализ спектров ЦР позволяет определить ряд важных характеристик облака СН, их кинетику и пространственное распределение.

Эксперименты проводились на образцах бездислокационного Ge n -типа с концентрацией остаточной примеси $\sim 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ в форме диска ϕ 4 мм и толщиной 2 мм, неоднородно сжатого в направлении $\langle 111 \rangle$. Оптическое возбуждение осуществлялось импульсным YAG: Nd³⁺-лазером ($\lambda = 1,06$ мкм). Образец помещался в СВЧ резонатор в максимум электрического поля E , при этом ось $\langle 111 \rangle$ кристалла была параллельна внешнему магнитному полю H и перпендикулярна E . Запись спектров ЦР производилась с помощью СВЧ спектрометра ($\lambda = 3,2$ см) со строб-интегратором с различной задержкой (t_d) относительно возбуждающего импульса света. Величина приложенного давления составляла $\sim 1500 \text{ кг/см}^2$ и оценивалась по сдвигу линии рекомбинационного излучения БЭДК [3], а время жизни капли определялось по кинетике люминесценции ($\tau_0 \approx 500$ мксек).



Спектры циклотронного резонанса неоднородно деформированного Ge при различных задержках относительно лазерного импульса: на вставке $t_d = 10$ мксек, 1 – 1000 мксек, 2 – 1700 мксек, 3 – 2000 мксек, 4 – 2300 мксек. $T = 4,2$ К, $P = 1500$ кг/см², $\mathbf{P} \parallel \langle 111 \rangle \parallel \mathbf{H} \perp \mathbf{E}$. Начальный уровень возбуждения – 10^{13} электронно-дырочных пар в образце. Пунктирные линии – расчет формы линии ЦР по формуле (2)

На рисунке представлена серия спектров ЦР неоднородно сжатого Ge при $T = 4,2$ К, снятых при различных задержках после лазерного импульса. Видно, что форма спектров довольно сложная: имеется центральная узкая линия и явно выраженное широкое правое крыло. При относительно малых задержках ($t_d \leq 50$ мксек) линии в спектре плохо разрешены. При больших временах задержки в спектре ЦР имеется единственная несимметричная линия с максимумом, соответствующим электронной эффективной массе $m^* = 0,08 m_0$. В интервале $t_d = 50 \div 1000$ мксек мы получили идентичные формы линий со слабо изменяющейся амплитудой. При увеличении $t_d > 1000$ мксек правое крыло линии постепенно уменьшается. Мы предположили, что наблюдаемые особенности в спектре связаны с неоднородностью концентрации СН вокруг капли. Узкая линия, очевидно, принадлежит периферийным областям с относительно низкой концентрацией носителей и частотой столкновений (ν), а широкое крыло – приповерхностным слоям, прилегающим непосредственно к капле, где концентрация (n_{e0}) и ν максимальны. Линии, отвечающие другим эффективным массам, отсутствуют.

Для того, чтобы из экспериментальных результатов получить значения n_{e0} и ν для СН, была проведена аппроксимация формы спектра с помощью ЭВМ. Теоретическая модель для расчета формы линии ЦР для неоднородно деформированного Ge будет подробно опубликована позднее. Здесь же приведем основные моменты этого расчета.

Пространственное распределение СН над поверхностью капли, находящейся в потенциальной яме деформации с энергией $E_s = -ar^2$, где a — параметр давления, r — расстояние до центра ямы, можно описать соотношением [4]:

$$n_e(r, R) = n_{e0} \exp \left[-\frac{a(r^2 - R^2)}{kT} \right], \quad (1)$$

где R — радиус капли, n_{e0} — концентрация носителей вблизи поверхности БЭДК при $r \approx R$.

Форма линии ЦР свободных носителей в присутствии БЭДК описывается следующим интегралом:

$$P_{\text{ЦР}} = \int_R^{\infty} \left\{ \frac{\sigma'(H) E_{\perp}^2(r)}{\left[1 + \kappa \epsilon_0 - \kappa - \frac{4\pi\sigma'(H)\kappa}{\nu} \right]^2 + \left[\frac{4\pi\sigma'(H)\kappa}{\omega} \right]^2} + \frac{\sigma'(0) E_{\parallel}^2(r)}{\left[1 + \kappa \epsilon_0 - \kappa - \frac{4\pi\sigma'(0)\kappa}{\nu} \right]^2 + \left[\frac{4\pi\sigma'(0)\kappa}{\omega} \right]^2} \right\} 4\pi r^2 dr. \quad (2)$$

Здесь: $\sigma'(H)$, $\sigma'(0)$ — активная проводимость образца в магнитном поле (с учетом плазменного сдвига) и без магнитного поля (см., например, [5]), знаменатель обусловлен суммарной диэлектрической проницаемостью решетки ϵ_0 и носителей [6], κ — деполаризующий фактор, E_{\perp} и E_{\parallel} — усредненные значения поля перпендикулярно и параллельно магнитному полю за счет искажения внешнего электромагнитного поля проводящей сферой (каплей) [7].

Известно, что при больших концентрациях СН частота соударений ν является функцией n_e . В работе [8] была получена зависимость $\nu(n_e)$ при $T = 4,2$ К в Ge без давления: $\nu(n_e) = \nu_{\text{ф}} + b n_e$, где $\nu_{\text{ф}}$ — частота столкновений с фононами, $b = 0,08$ см³/сек. В наших расчетах коэффициент b варьировался. Интеграл (2) рассчитывался на ЭВМ, при этом проводилась вариация трех параметров: величин b , n_{e0} и R . Удовлетворительное согласие наблюдаемых спектров с расчетом получено при $b = 0,1$; $n_{e0} = (3,5 \pm 0,5) \cdot 10^{12}$ см⁻³ при $R = 0,4$ мм; $R = 0,22$ мм; $R = 0,188$ мм; $n_{e0} = (2,8 \pm 0,4) \cdot 10^{12}$ см⁻³ при $R = 0,08$ мм и $n_{e0} = (2,4 \pm 0,4) \cdot 10^{12}$ см⁻³ для $R = 0,05$ мм. Параметр давления a принимался равным 7 мэВ/мм², полученный в аналогичных условиях [9]. Найденное значение концентрации СН у поверхности капли $n_{e0} = 3,5 \cdot 10^{12}$ см⁻³ хорошо согласуется с расчетом по величине работы выхода $E_0 = 4,6$ мэВ [10].

На рисунке представлено сопоставление рассчитанных и экспериментальных спектров ЦР. Обращают на себя внимание два участка в спектрах, где наблюдается отклонение от экспериментальных кривых: в начальной и средней части спектра. Первое из расхождений, возможно, связано с несферичностью капли, которое вполне может иметь место при малых t_d , когда размеры капли сравнимы с размером потенци-

альной ямы. Что касается второго участка, то его естественно приписать слабой линии дырок с $m^* = 0,13 m_0$, характерной для деформированного по направлению $\langle 111 \rangle$ Ge [11].

Полученные результаты позволяют сделать вывод относительно пространственного распределения СН в образце в присутствии БЭДК. Наличие в спектрах единственной электронной линии в указанной ориентации говорит о принадлежности всех электронов к единственной долине и свидетельствует о расположении носителей в образце вблизи капли. Удовлетворительное описание формы спектра с помощью приведенной модели подтверждает справедливость выражения (1), из которого можно получить эффективный размер слоя СН (расстояние, на котором плотность носителей падает в e раз): $\delta r \approx 60$ мкм при $R \approx 400$ мкм.

В заключение авторы благодарят Л.В.Келдыша, В.А.Миляева, В.А.Санину за обсуждение настоящей работы.

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

Поступила в редакцию
20 февраля 1980 г.

Литература

- [1] J.P.Wolfe, R.S.Markiewicz, S.M.Kelso, J.E.Furneaux, C.D.Jeffries, Phys. Rev., **B18**, 1479, 1978.
- [2] T.Ohyama. Phys. of Semicond, 1978. Inst. Phys. Conf. Ser., **43**, 375, 1979.
- [3] C.Benoit à la Guillaume, M.Voos, F.Salvan. Phys. Rev., **B5**, 3079, 1972.
- [4] R.S.Markiewicz, J.P.Wolfe, C.D.Jeffries. Phys. Rev., **B15**, 1988. 1977.
- [5] G.Dresselhaus, A.F.Kip, C.Kittel. Phys. Rev., **98**, 368, 1955.
- [6] Б.В.Зубов, А.А.Маненков, В.А.Миляев, Г.Н.Михайлова, Т.М.Мурина, А.С.Сеферов. ФТТ, **18**, 706, 1976.
- [7] М.А.Дивильковский. ЖТФ, **9**, 433, 1939.
- [8] А.А.Маненков, В.А.Миляев, В.А.Санина. ДАН СССР, **250**, 1371, 1980.
- [9] А.Г.Макаров, А.А.Маненков, Г.Н.Михайлова, А.С.Сеферов. Письма в ЖЭТФ, **30**, 411, 1979.
- [10] А.А.Маненков, В.А.Миляев, Г.Н.Михайлова, А.С.Сеферов. Письма в ЖЭТФ, **24**, 141, 1976.
- [11] J.C.Hensel. Sol. St. Comm., **4**, 231, 1966.