

МАГНЕТОПЛАЗМЕННЫЙ РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЛЯХ В ГЕРМАНИИ НА СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

*В.И.Газриленко, В.Л.Кононенко, Т.С.Мандельштам,
В.Н.Мурзин*

Исследованы спектры магнетоплазменного резонанса в ЭДК в германии в субмиллиметровом диапазоне длин волн 440 – 770 мкм в магнитных полях до 35 кэ. Экспериментально определены значения перенормированных масс носителей в ЭДК.

В первых исследованиях магнетоплазменного резонанса (МПР) в электронно-дырочных каплях (ЭДК) в германии, выполненных в далекой ИК области [1], наблюдалось расщепление полосы резонансного поглощения ЭДК в магнитном поле и появление особенностей на длинноволновом краю поглощения. Эти изменения объяснялись на основе развитой модели МПР в ЭДК [1 – 3], согласно которой при наложении магнитного поля должно происходить расщепление плазменного резонанса ЭДК и возникновение гибридных магнетоплазменных решений в области циклотронных частот свободных носителей. В исследованиях [1, 2] из-за недостаточного спектрального разрешения не удалось изучить длинноволновую часть МПР в ЭДК. Эта область МПР в ЭДК в Ge исследовалась позже в нескольких дискретных точках спектра [4 – 6].

В настоящей работе методами монохроматической субмиллиметровой спектроскопии на основе ламп обратной волны (ЛОВ) [7, 8] впервые исследована длинноволновая часть МПР в ЭДК в Ge при плавном сканировании по спектру в области 1,6 – 2,8 мэв ($\lambda = 440 - 770$ мкм), т. е. как в области экситонного поглощения [8], так и за его пределами. Изучено изменение параметров линий МПР в зависимости от энергии фотонов и экспериментально показано, что эффективная масса носителей в ЭДК отличается от массы свободных носителей в Ge.

Измерения изменения пропускания образцов чистого Ge ($N_A \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$) на субмиллиметровых волнах при оптической генерации неравновесных носителей проводились методом ЛОВ [8] при температурах 4,2–1,9К в световодном криостате, использованном ранее при изучении МПР в ЭДК в Ge в области плазменного резонанса ЭДК [1]. Исследования велись для ориентации $H \parallel [111]$ в полях до 35 кэ при фарадеевской конфигурации $E_\omega \perp H$.

На рис. 1 представлены типичные спектры, измеренные при 4,2 и 1,9К в области экситонного поглощения ($\hbar\omega = 2,42$ мэв) [8] и за его пределами ($\hbar\omega = 2,25$ мэв). На спектрах видны линии ЦР неравновесных электронов Se_1 , энергетический эллипсоид которых вытянут вдоль H , и линии Ch_1, Ch_2, Ch_3 , соответствующие переходам между уровнями Ландау деформированной в магнитном поле валентной зоны [5, 9]. Поглощение при 2,42 мэв в малых магнитных полях обусловлено фотовозбуждением свободных экситонов

[7, 8] и уменьшается с ростом поля, так как экситонный спектр смещается в сторону больших энергий.

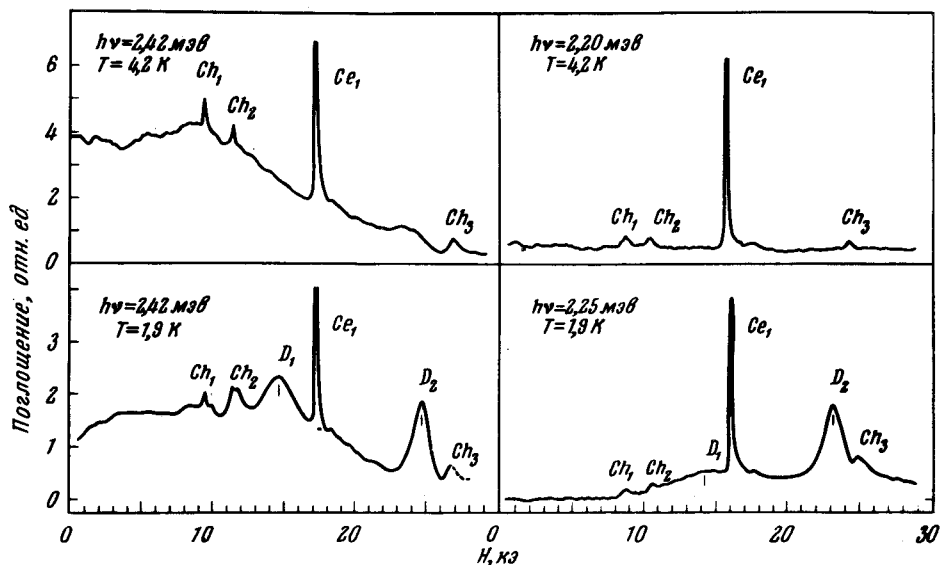


Рис. 1. Спектры МПР в ЭДК в германии

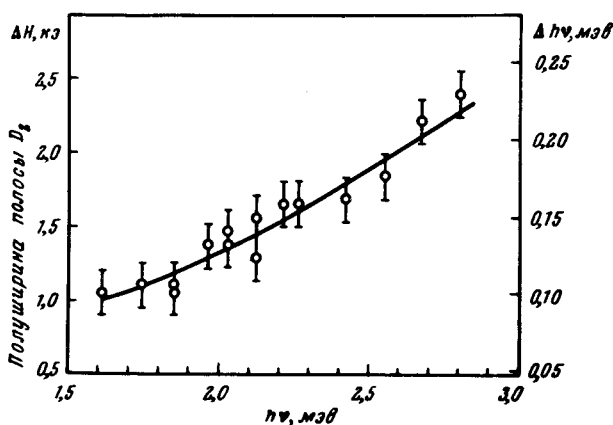


Рис. 2. Зависимость полуширины линии D_2 от энергии фотонов.

При понижении температуры до 1,9К наблюдается падение интенсивности экситонного поглощения из-за перехода экситонов в конденсированное состояние и возникновение в спектре новых весьма широких линий D_1 и D_2 . Появление этих линий, а также их спектральное положение относительно линий ЦР свободных носителей находятся в соответствии с предсказаниями модели МПР в ЭДК в Ge, развитой в [1 - 3]. Интенсивность линий D_1 и D_2 уменьшается с ростом длины волны (выражение для интенсивности МПР содержит множитель λ^{-1} [3]), причем линия D_1 является более широкой и затухает с длиной волны быстрее, чем линия D_2 (на рис. 1 при 2,25 мэВ она практически не видна). Полуширина линии D_2 , как видно из рис. 2, составляет примерно 0,2 мэВ (константа затухания $\gamma \approx 2,5 \cdot 10^{11} \text{ сек}^{-1}$), т. е. более, чем на порядок величины отличается от полуширины плазменного резонанса, измерен-

ного в области 9 мэв [1] и уменьшается с ростом длины волны. Возможность подобной частотной зависимости у отмечалась в [1] в связи с обсуждением различных механизмов затухания плазменных колебаний в ЭДК в германии.

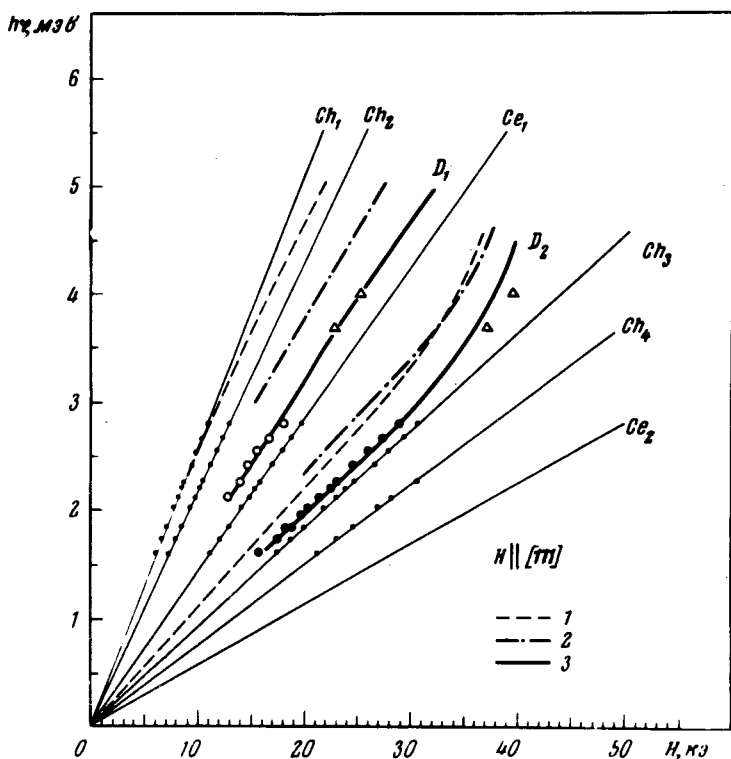


Рис. 3. Спектральное положение линий ЦР свободных носителей и линий МПР в ЭДК в германии (точки и кружки — наши экспериментальные данные, треугольники — данные [5]); рассчитанные кривые: 1 — по модели [3], 2 — с учетом квантовых деформаций валентной зоны Ge, 3 — то же для измененных масс носителей

На рис. 3 представлены результаты измерений спектральной зависимости МПР в ЭДК и квантового циклотронного резонанса в системе свободных носителей, а также результаты теоретических расчетов МПР в ЭДК на основе модели [3]. Согласно этой модели, между каждыми двумя частотами ЦР одинакового знака круговой поляризации возникает резонансная частота МПР. В силу этого линия D_1 обусловлена наличием легких и тяжелых дырок, а линия D_2 — наличием в данной ориентации двух групп электронов с разными циклотронными частотами (Ce_1 и Ce_2). Положение этих линий в полях до $20 \div 30$ кэ, как отличалось в [2, 3] и как показали численные расчеты, слабо зависит от концентрации частиц в ЭДК и в основном определяется массами носителей. Это, в принципе, дает возможность оценить по данным наших измерений величину эффективных масс носителей в ЭДК. Как видно из рис. 3, расчет, про-

веденный на основе параметров свободных носителей в Ge даже с учетом квантовых деформаций валентной зоны Ge в магнитном поле [9], все же не позволяет удовлетворительно описать результаты эксперимента. Это указывает на то, что эффективная масса носителей в ЭДК, отлична от массы свободных носителей в Ge. Хорошее согласие с экспериментом получено для масс электронов $m_1^{\text{ЭДК}} = 1,1 m_1$, $m_{11}^{\text{ЭДК}} = m_{11}$ и масс дырок в валентной зоне, утяжеленных на 15%. Это соответствует теоретическим оценкам перенормировки масс носителей в ЭДК из-за многочастичных эффектов [10]. Заметим, что теоретическая зависимость положения D_2 , рассчитанная для концентрации частиц в ЭДК $n_k = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, отклоняется от эксперимента в полях $H \geq 35 \text{ кэ}$. Это отклонение вследствие начинающегося выхода нулевого уровня Ландау "легких" электронов за пределы уровня Ферми показывает, что концентрация n_k в ЭДК в этих полях существенно возрастает.

Авторы признательны доктору Дж. Хенселю (Белл-лаборатория, США) за предоставление рассчитанных дисперсионных кривых энергетического спектра валентной зоны Ge в магнитных полях $H \parallel [111]$.

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

Поступила в редакцию
15 мая 1976 г.

Литература

- [1] В.Н.Мурзин, В.А.Заяц, В.Л.Кононенко. Proc. 11th Inter. Conf. Phys. Semicond, p.678. Warszawa, 1972; ФТТ, 15, 3634; ФТТ, 17, 2684, 1975.
- [2] В.Л.Кононенко, В.А.Заяц, В.Н.Мурзин. Тез. докл. на II Симпозиуме по физике плазмы и электрич. неустойчивостей в твердых телах, Вильнюс, 1974.
- [3] В.Л.Кононенко. ФТТ, 17, 3264, 1975.
- [4] T.Sanada, T.Ohayama, E.Otsuka. Sol. St. Comm., 12, 1201, 1973.
- [5] K.Muro, Y.Nisida. J. Phys. Soc. Jap. 40, №4, 1976.
- [6] K.Fujii, E.Otsuka. J. Phys. Soc. Jap., 38, 742, 1975.
- [7] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, Н.Г.Птицына. ЖЭТФ, 65, 587, 1973; 70, 224, 1976.
- [8] Н.В.Гузеев, В.А.Заяц, В.Л.Кононенко, Т.С.Мандельштам, В.Н.Мурзин. ФТП, 8, 1633, 1974.
- [9] K.Suzuki, J.C.Henzel. Phys. Rev. (b), 9, 4184, 1974.
- [10] T.M.Rice. Nuovo Cim. 23B, 266, 1974.