

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ МАГНЕТОДИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЛЯХ В ГЕРМАНИИ

*В.И.Гавриленко, В.Л.Кононенко, Т.С.Мандельштам
В.Н.Мурзин, С.А.Саукин*

В субмиллиметровом диапазоне длин волн ($\lambda = 0,6 \div 1,35$ мм) впервые экспериментально обнаружено магнетодипольное резонансное поглощение в ЭДК в германии. В результате изучения обнаруженного явления непосредственно измерены эффективные массы электронов в ЭДК. Определены размеры и изменение формы капель в магнитном поле.

Отличие эффективных масс электронов и дырок в электронно-дырочных каплях (ЭДК) от масс свободных носителей в Ge, обусловленное коллективными многочастичными возбуждениями системы, является одной из фундаментальных особенностей конденсированной фазы экситонов в Ge [1]. Однако применение обычных методов типа циклотронного резонанса (ЦР), с помощью которых получена основная ин-

формация о зонных параметрах большинства полупроводников, при исследовании ЭДК затруднено вследствие гибридизации циклотронных и плазменных колебаний из-за высокой плотности конденсата и ограниченных размеров капель ($r \ll \lambda_e$) [1 - 4]. Вместе с тем спектры магнетоплазменного резонанса (МПР) в области циклотронных частот, в принципе, содержат информацию не только о характеристиках носителей в ЭДК, но и о других свойствах конденсированной фазы.

В настоящей работе при исследовании оптических свойств ЭДК в Ge в области циклотронных частот носителей при $H = 0 \div 30$ кэ (суб-миллиметровые волны) впервые наблюдались линии резонансного поглощения, обусловленные взаимодействием ЭДК с магнитным полем электромагнитной волны (магнетодипольный МПР). В результате изучения обнаруженного явления наиболее прямым образом измерены эффективные массы электронов в ЭДК, а также определены размеры и измененные формы капель в постоянном магнитном поле.

Исследования проводились в диапазоне $\lambda = 0,6 \div 1,35$ мм с помощью спектрометра на основе ламп обратной волны [1] при интенсивном оптическом возбуждении кристалла светом YAG · Nd³⁺ лазера непрерывного действия ($\lambda = 1,06$ мкм, $P_{max} \sim 3$ вт). Оптически индуцированное изменение пропускания чистого Ge ($N_A \sim 10^{12}$ см⁻³) при 4,2 - 1,7К измерялось дифференциальным методом в ориентациях $H \parallel [111]$ и $H \parallel [110]$ при $H = 0 \div 30$ кэ.

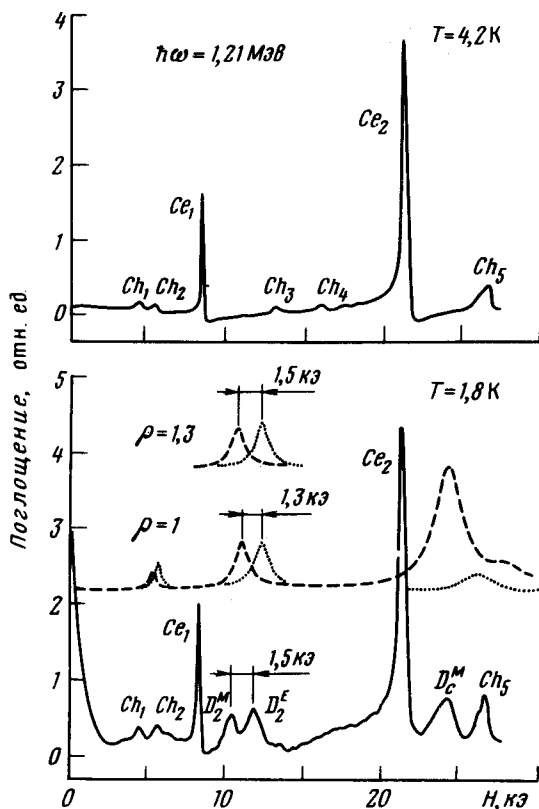


Рис. 1. Спектры МПР в ЭДК в германии. Сплошными линиями показаны данные эксперимента при $H \parallel [111]$, пунктирными и точечными кривыми - результаты расчета, соответственно, магнетодипольного и электродипольного поглощения для сферической ($\rho = 1$) и сплюснутой ($\rho = 1,3$) ЭДК

На рис. 1 представлены типичные спектры поглощения, измеренные при 4,2 и 1,8К. Видно, что при понижении температуры, когда образуется

конденсированная фаза экситонов, в спектрах наряду с линиями ЦР свободных электронов ($Ce_1 - Ce_2$) и дырок ($Ch_1 - Ch_2$) появляются новые более широкие линии D_2^M , D_2^E и D_C^M . Все они связаны с образованием ЭДК в Ge. Однако, если D_2^E подробно изучена в области более коротких волн и определяется электродипольным (ЭД) механизмом поглощения [1], то две другие не могут быть объяснены этим механизмом прежде всего из-за своего спектрального положения. Кроме того, их интенсивность иначе зависит от частоты чем в случае ЭД поглощения (рис. 2).

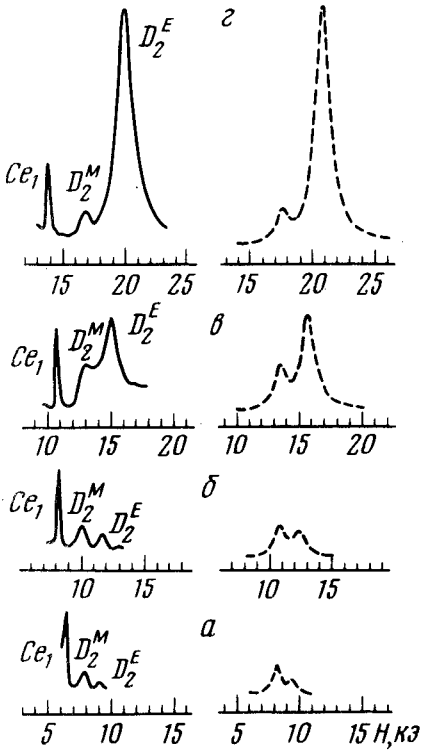


Рис. 2. Измеренные (сплошные линии) и рассчитанные (пунктир) спектры МПР в ЭДК в германии при $H \parallel [111]$ на различных частотах $\hbar\omega$: а - 0,92 мэв, б - 1,20 мэв, в - 1,54 мэв, г - 2,03 мэв. Расчеты выполнены по (3) для плюснутых капель: а - r ЭФФ = 2,8 мкм, $\rho = 1, 2$; б - r ЭФФ = 2,8 мкм; $\rho = 1, 3$; в - r ЭФФ = 2,2 мкм; $\rho = 1, 4$; г - r ЭФФ = 1,6 мкм, $\rho = 1, 7$

Новые резонансы удается объяснить как результат магнетодипольного (МД) взаимодействия волны с ЭДК ($r \ll \lambda_0$). В теории Ми оно представлено вторым членом в разложении по малому параметру $(2\pi r/\lambda_0)^2$, где r/λ_0 - отношение радиуса капли к длине электромагнитной волны в кристалле. Для ЭДК в Ge в постоянном магнитном поле и фарадеевской конфигурации $E_\omega, H_\omega \perp H$ ЭД и МД поглощение описывается следующим выражением [3 - 5]

$$\alpha_{\pm} \sim \omega \left\{ \text{Im} \frac{\tilde{\epsilon}_{\pm} - 1}{\tilde{\epsilon}_{\pm} + 2} + \frac{1}{30} \left(\frac{2\pi r}{\lambda_0} \right)^2 \text{Im} \tilde{\epsilon}_{\pm}^{\text{ЭФФ}} \right\}, \quad \text{где } \tilde{\epsilon}_{\pm}^{\text{ЭФФ}} = \frac{2\tilde{\epsilon}_{\pm} \tilde{\epsilon}_{\parallel}}{\tilde{\epsilon}_{\pm} + \tilde{\epsilon}_{\parallel}}. \quad (1)$$

Здесь $\tilde{\epsilon}$ - относительная диэлектрическая проницаемость ЭДК в Ge [3]. Индексы \pm соответствуют двум круговым (дырочной и электронной) поляризациям электромагнитной волны, $\tilde{\epsilon}_{\parallel}$ - продольная компонента диэлектрической проницаемости ЭДК. Хотя МД поглощение в далекой

МК области гораздо слабее чем ЭД поглощение, оно медленнее спадает с ростом длины волны и при $\lambda > 500$ мкм может оказаться преобладающим (из-за частотного хода $\epsilon(\omega)$). Как видно из рис. 1, где представлены рассчитанные согласно (1) спектры МПР в ЭДК в Ge, положение обнаруженных новых линий удовлетворительно объясняется МД механизмом поглощения (D_2^M и D_C^M).

Весьма важной и нетривиальной особенностью обнаруженного МД поглощения является тот факт, что в случае, если эллипсоид эффективной массы какого-либо сорта носителей наклонен к **H**, резонансное МД поглощение в ЭДК возникает точно на циклотронной частоте этих носителей (см. (1)). Нетрудно видеть, что наблюдение таких резонансов позволяет непосредственно измерять эффективные массы электронов в ЭДК, не прибегая к сложным расчетам, требующим учета структуры валентной зоны Ge в магнитном поле [1, 4]. В ориентациях **H** || [111] и **H** || [110] такими циклотронными репликами являются линии D_C^M (рис. 1). По экспериментально измеренному в данной работе положению этих линий на основе известных формул для циклотронных частот электронов в Ge были определены величины поперечной $m_t^{\text{ЭДК}}$ и продольной $m_l^{\text{ЭДК}}$ эффективных масс электронов в ЭДК:

$$m_t^{\text{ЭДК}} = (1,15 \pm 0,02) m_t; \quad m_l^{\text{ЭДК}} = (1,0 \pm 0,2) m_l. \quad (2)$$

Как следует из (1), МД поглощение в отличие от ЭД поглощения определяется не просто объемом конденсированной фазы, а сильнее всего зависит от радиуса капель и, следовательно, в большей степени чувствительно к изменению их формы. Это позволяет по отношению интенсивностей МД и ЭД линий в измеренных спектрах получать информацию о размерах ЭДК. На рис. 1 вместе с экспериментальными данными представлены спектры ЭД и МД поглощения, рассчитанные для капель радиусом 2,4 мкм, который соответствует измеренному соотношению интенсивностей линий D_2^M и D_2^E . Сопоставление теории с экспериментом для другой МД линии D_C^M , расположенной в более сильных магнитных полях, приводит к выводу, что размеры капель в наших условиях уменьшаются с ростом магнитного поля. Это подтверждается также данными, представленными на рис. 2. Обнаруженный эффект, по-видимому, обусловлен падением времени жизни носителей в ЭДК из-за увеличения плотности капель в магнитном поле [4].

Как уже отмечалось, рассчитанные согласно (1) спектры МПР удовлетворительно согласуются с экспериментом. Однако можно заметить, что измеренное расстояние между линиями D_2^M и D_2^E (рис. 1) несколько больше, чем получается из расчета. Это расхождение не удается объяснить в рамках развитой модели МПР в ЭДК в Ge для капель сферической формы. В результате рассмотрения электродинамической задачи о взаимодействии волны с ЭДК, имеющей форму сплюснутого или вытянутого вдоль **H** эллипсоида вращения, можно показать, что в этом случае поглощение описывается выражением

$$\alpha_{\pm} \sim \omega \left\{ \frac{4\pi}{3} \text{Im} \frac{\tilde{\epsilon}_{\pm} - 1}{4\pi + L(\tilde{\epsilon}_{\pm} - 1)} + \frac{1}{30} \left(\frac{2\pi r \text{эфф}}{\lambda_0} \right)^2 \text{Im} \tilde{\epsilon}_{\pm}^{\text{эфф}} \right\}, \quad (3)$$

где

$$\tilde{\epsilon}_{\pm}^{\text{эфф}} = \rho^{-4/3} \frac{2\tilde{\epsilon}_{\pm} \rho^2 \tilde{\epsilon}_{\parallel}}{\tilde{\epsilon}_{\pm} + \rho^2 \tilde{\epsilon}_{\parallel}} .$$

Здесь L — деполаризующий фактор ЭДК, $\rho = a/b$ — отношение поперечной и продольной полуосей эллипсоида, $r^{\text{эфф}} = (a^2 b)^{1/3}$. Полученные в настоящей работе результаты удовлетворительно объясняются, если предположить, что при наложении магнитного поля происходит сплющивание ЭДК. Как видно из рис. 1, 2 в полях $H = 10 \div 20$ кэ сплюснутость капель увеличивается от $\rho \sim 1,2$ до $\rho \sim 1,7$. Обнаруженное изменение формы капель в магнитном поле, по-видимому, обусловлено рекомбинационным магнетизмом ЭДК [4, 6].

В заключение отметим наличие резкого падения поглощения в полях до 1,5 кэ при $T = 1,8\text{К}$ (рис. 1), аналогичного наблюдавшемуся в [2] и не имеющего пока однозначного объяснения. Не исключено, что этот спад обусловлен размерным эффектом в ЭДК, так как в полях ~ 1 кэ циклотронный радиус носителей становится сравнимым с размерами капли.

Авторы признательны В.Д.Копаневу за помощь при конструировании аппаратуры.

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

Поступила в редакцию
8 июня 1977 г.

Литература

- [1] В.И.Гавриленко, В.Л.Кононенко, Т.С.Мандельштам, В.Н.Мурзин. Письма в ЖЭТФ, **23**, 701, 1976; ДАН, СССР, **232**, 802, 1977.
- [2] В.Н.Мурзин, В.А.Заяц, В.Л.Кононенко. ФТТ, **15**, 3634, 1973.
- [3] В.Л.Кононенко. ФТТ, **17**, 3264, 1975.
- [4] В.Л.Кононенко, В.Н.Мурзин. Письма в ЖЭТФ, **24**, 590, 1976; Препринт ФИАИ №54, 1977.
- [5] G. W. Ford, J. K. Furdyna, S. A. Werner. Phys. Rev., **B12**, 1452, 1975.
- [6] А.С.Каминский, Я.Е.Покровский. Письма в ЖЭТФ, **21**, 431, 1975.