

МАГНЕТОПЛАЗМЕННЫЙ РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЛЯХ  
В ГЕРМАНИИ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ  
ОРИЕНТАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. И. Гавриленко, В. Н. Мурзин, С. А. Саунин, А. П. Чебстарев

УДК 537.311.33

Построена теория магнетоплазменного резонанса в ЭДК в Ge при произвольной ориентации магнитного поля. С помощью численных расчетов проанализирован спектральный состав поглощения. Полученные результаты используются для интерпретации экспериментальных данных.

Как известно, экспериментальное изучение магнетоплазменного резонанса (МНР) в электронно-дырочных каплях (ЭДК) в Ge позволяет определять ряд важнейших характеристик конденсированной фазы экситонов /1-3/. Подробные исследования на субмиллиметровых волнах с помощью ламп обратной волны привели к обнаружению циклотронных ветвей МНР в ЭДК в Ge, обусловленных двумя механизмами взаимодействия ЭДК с электромагнитной волной - электродипольным (ЭД) и магнетодипольным (МД) /2-3/. Из сопоставления экспериментальных данных с результатами расчета здесь может быть получена информация об эффективных массах носителей в конденсированной фазе, частотной зависимости величины затухания магнетоплазменных колебаний, а также о таких макроскопических характеристиках ЭДК, как их размеры и форма в магнитном поле. Однако до настоящего времени такое сопоставление могло проводиться лишь в случае наиболее симметричных ориентаций  $n^{\circ} \parallel [111]$ ,  $[001]$  в Ge, для которых была разработана соответствующая теория МНР /1,3-6/. В результате проведенных в последнее время исследований /3/ возникла необходимость в более общей теории МНР, позволяющей обрабатывать результаты эксперимента при произвольной кристаллографической ориентации магнитного поля.

Для построения такой теории необходимо решить электродинамическую задачу о взаимодействии плоской электромагнитной волны  $\vec{E}^\omega, \vec{B}^\omega \sim e^{-i\omega t}$  с ЭДК с граничными условиями на поверхности капли, которую мы приближенно рассматриваем как эллипсоид вращения  $x^2/a^2 + y^2/a^2 + z^2/b^2 \leq 1$  ( $\hat{n} \parallel \vec{H}^0$ ) /7-8/. Малость размеров ЭДК по сравнению с характерными длинами волн в кристалле Ge и внутри ЭДК, а также по сравнению с толщиной скин-слоя, позволяют ограничиться дипольными приближениями; при этом поглощаемая в капле мощность

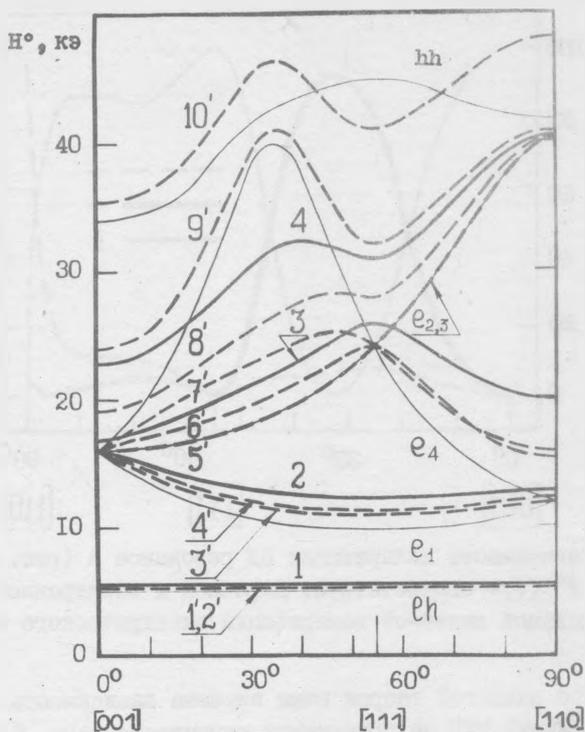
$$P = (\omega/2) \text{Im} \bar{d}(\vec{E}^\omega)^* + (\omega/2) \text{Im} \bar{m}(\vec{B}^\omega)^*,$$

где  $\bar{d} = \int_V \bar{P} dV$  - электрический дипольный момент ЭДК, наведенный однородным электрическим полем  $\vec{E}^\omega/I$ , а  $\bar{m} = (1/2c) \int_V [\vec{r} \times \vec{J}] dV$  - магнитный дипольный момент ЭДК. Этот момент создается токами  $\vec{J}$ , которые индуцируются в капле однородным переменным магнитным полем  $\vec{B}^\omega$  (токи Фуко) /5-6/. В обоих случаях необходимо решить систему трех линейных алгебраических уравнений с тремя неизвестными - компонентами векторов  $\bar{d}$  или  $\bar{m}$ , коэффициенты перед которыми выражаются через элементы тензора диэлектрической проницаемости ЭДК. Таким образом, спектральный состав как ЭД, так и МД поглощения ЭДК определяется конкретным видом тензора  $\epsilon_{ij}$ , его зависимостью от частоты и магнитного поля. Для нахождения явного вида  $\epsilon_{ij}(\omega, \vec{H}^0)$ , как обычно /4/, рассматривались уравнения движения носителей в безграничной электронно-дырочной жидкости в приближении Друде. При этом в случае произвольной кристаллографической ориентации  $\vec{H}^0$  все девять элементов  $\epsilon_{ij}$  отличны от нуля.

Ввиду чрезвычайной громоздкости полученных аналитических выражений для  $\epsilon_{ij}(\omega, \vec{H}^0)$ , не позволяющей непосредственно судить о спектральном составе поглощения, в дальнейшем нами использовались численные методы. На рис. 1 представлены результаты расчета на ЭВМ положений ЭД и МД линий МПР в ЭДК в области циклотронных частот носителей в зависимости от ориентации магнитного поля  $\vec{H}^0$ , которое, оставаясь в плоскости типа  $\{110\}$ , поворачивается от направления  $[001]$  через  $[111]$  до  $[110]$ . Обозначения  $\omega_1 - \omega_4$  соответствуют ветвям циклотронных частот электронов из различных долин,

lh - легких, а hh - тяжелых дырок. \*)

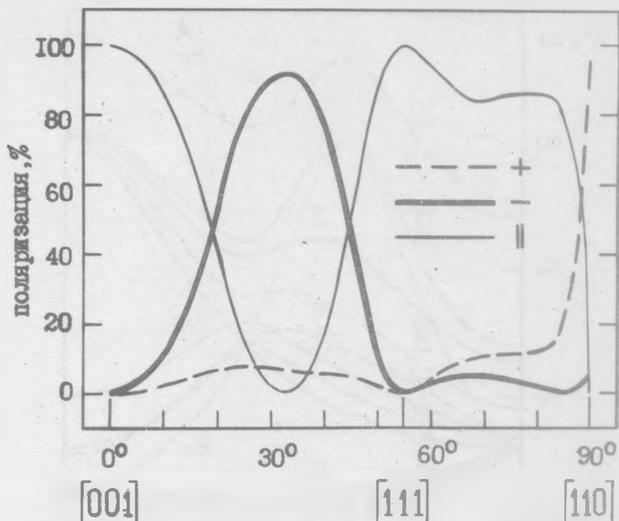
Как видно из рис. I, при повороте  $\bar{H}^\circ$  количество резонансов, как ЭД так и МД, в целом не изменяется, за исключением некото-



Р и с. I. Рассчитанные зависимости положений ЭД резонансов (жирные сплошные линии, цифры без штрихов) и МД резонансов (пунктир, цифры со штрихами) в сферической ЭДК в Ge от ориентации  $\bar{H}^\circ$  при  $\frac{1}{2}\hbar\omega = 1,2$  мэв и  $\gamma = 0,001$  мэв. Тонкими линиями показаны магнитные поля, соответствующие циклотронным частотам носителей в конденсированной фазе

\*) Расчет проводился с использованием классической модели легких и тяжелых дырок в Ge. Легкие дырки полагались изотропными, а анизотропия циклотронной массы тяжелых дырок учитывалась согласно /9/.

рых ориентаций, где может происходить слияние нескольких линий в одну, например,  $\vec{H}^0 \parallel [001]$ ,  $[111]$ . Это правило сохранения количества резонансов справедливо и для других ориентаций, когда  $\vec{H}^0$  не лежит в плоскости типа  $\{110\}$  <sup>\*)</sup>.



Р и с. 2. Зависимость поляризации ЭД резонанса 4 (рис. 1) от ориентации  $\vec{H}^0$  (+, - соответствуют дырочной и электронной круговым, а || — продольной линейной поляризации электрического поля волны)

На основе развитой теории нами изучена зависимость степени поляризации линий МПР от ориентации магнитного поля. В наиболее симметричных ориентациях линии МПР характеризуются 100%-ной степенью круговой или линейной продольной поляризации  $\{4,2,6\}$ , что является следствием диагональности тензора диэлектрической проницаемости вещества ЭДК. Однако при отклонении от этих ориентаций тензор  $\epsilon_{ij}$  перестает быть диагональным, и каждый из ЭД и МД резонансов может проявляться при любой поляризации соответственно электрического или магнитного поля волны. Как видно из рис. 2, на котором представлены результаты расчета для одной из

<sup>\*)</sup> На рис. 1 не показана МД линия ( $II'$ ), расположенная в полях 60 кэ.

ЭД линий МПР, изменения поляризации при повороте магнитного поля могут иметь весьма радикальный характер. Такое поведение типично для большинства линий МПР в ЭДК в  $\text{Ge}$ , обусловленных в основном электронами с сильно анизотропными массами.

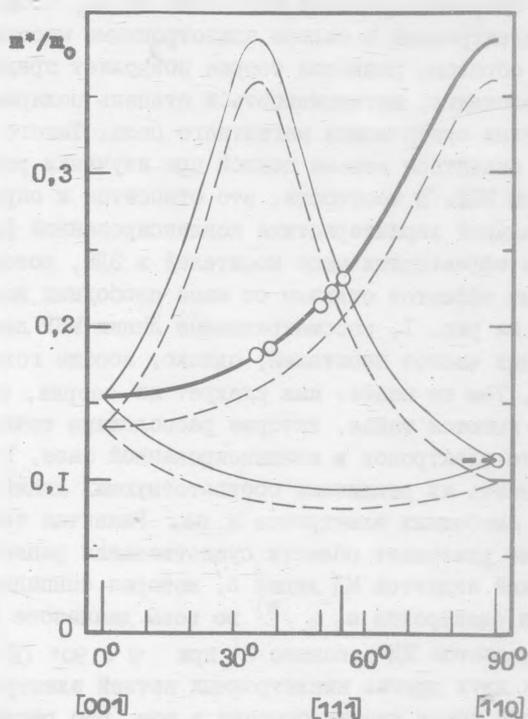
Таким образом, развитая теория позволяет предсказывать спектральное положение, интенсивность и степень поляризации линий МПР при различных ориентациях магнитного поля. Такого рода информация может оказаться весьма ценной при изучении различных свойств ЭДК методом МПР. В частности, это относится к определению такой фундаментальной характеристики конденсированной фазы, как перенормировка эффективных масс носителей в ЭДК, которые в силу многочастичных эффектов отличны от масс свободных носителей в  $\text{Ge}$ . Как видно из рис. 1, рассматриваемые линии МПР лежат в области циклотронных частот носителей, однако, вообще говоря, не совпадают с ними. Тем не менее, как следует из теории, среди МД линий МПР в ЭДК имеются такие, которые расположены точно на циклотронной частоте электронов в конденсированной фазе. В дальнейшем мы будем называть их репликами соответствующих линий циклотронного резонанса свободных электронов в  $\text{Ge}$ . Развитая теория МПР непосредственно указывает области существования реплик. На рис. 1 такой репликой является МД линия  $5'$ , которая совпадает с циклотронной ветвью электронов  $e_{2,3}$  \*) во всем диапазоне углов. Другой репликой является МД резонанс  $3'$  при  $\varphi = 90^\circ$  ( $\vec{H}^0 \parallel [110]$ ) в точке слияния двух других циклотронных ветвей электронов  $e_1$  и  $e_4$ . Важный общий вывод теории состоит в том, что реплики возникают тогда и только тогда, когда данная циклотронная частота является общей по крайней мере для двух электронных долин.

Существование реплик является важнейшей особенностью МД поглощения. Их положение в экспериментальных спектрах позволяет, не прибегая к сложным численным расчетам [1-2], по простым формулам циклотронного резонанса непосредственно определять перенормировку электронных масс в ЭДК. Для измерения различных компонент эффективной массы необходимо изучать спектры поглощения при разных ориентациях магнитного поля. Результаты таких экспериментов пред-

---

\*) Символ  $e_{2,3}$  соответствует электронам из двух эквивалентных долин.

ставлены на рис. 3. Наличие целого ряда экспериментальных точек позволяет с одной стороны с уверенностью интерпретировать наблюдаемую ветвь МПР как ветвь реплик, а с другой стороны - надежно



Р и с. 3. Зависимости циклотронных масс от ориентации магнитного поля. Пунктир соответствует свободным электронам в Ge /9/, сплошная линия - электронам в ЭДК, жирной линией показана область существования реплик. Кружки - экспериментальные данные /3/

определить величины эффективных масс электронов в ЭДК /3/:

$$m_c^{\text{ЭДК}} = (1,15 + 0,02)m_c; \quad m_1^{\text{ЭДК}} = (1,0 + 0,2)m_1.$$

Невысокая точность определения  $m_1^{\text{ЭДК}}$  в данных экспериментах, проводившихся при фарадеевской конфигурации  $\vec{E} \parallel \vec{\omega}$ ,  $\vec{B} \perp \vec{n}^0$ , обуслов-

лена слабой чувствительностью положения наблюдаемых реплик к продольной массе электронов. Согласно развитой теории, для более точного определения  $m_1^{\text{ЭДК}}$  необходимо проводить измерения при продольной линейной поляризации  $\vec{E}^{\omega}$  на верхнем участке ветви реплик на рис. 3, то есть при ориентациях магнитного поля  $\vec{H}^0$ , близких к [110].

Авторы признательны В. Л. Кононенко за полезные обсуждения данной работы.

Поступила в редакцию  
6 февраля 1978 г.

### Л и т е р а т у р а

1. В. Л. Кононенко, В. Н. Мурзин, Письма в ЖЭТФ 24, 590 (1976); Препринт ФИАН № 54, 1977 г.
2. В. И. Гавриленко, В. Л. Кононенко, Т. С. Манделъштам, В. Н. Мурзин, Письма в ЖЭТФ 23, 701 (1976); ДАН 232, 802 (1977).
3. В. И. Гавриленко, В. Л. Кононенко, Т. С. Манделъштам, В. Н. Мурзин, С. А. Сауни, Письма в ЖЭТФ 26, 102 (1977).
4. В. Л. Кононенко, ФТТ 17, 3264 (1975).
5. G. W. Ford, J. K. Furdyna, S. A. Werner, Phys. Rev. B12, 1452 (1975).
6. В. И. Гавриленко, Краткие сообщения по физике ФИАН № 10, 27 (1977).
7. В. Л. Кононенко, ФТТ 19, 2010 (1977).
8. А. С. Каминский, ЖЭТФ 73, 1499 (1977).
9. G. Dresselhaus, A. F. Kip, C. Kittel, Phys. Rev. 98, 368 (1955).