

МЕЖДОЛИННЫЙ ЦИКЛОТРОННО-ПРИМЕСНЫЙ РЕЗОНАНС ЭЛЕКТРОНОВ В *n*-Ge

*Е.М.Гершензон, С.Л.Орлова, Л.А.Орлов,
Н.Г.Птицина, Р.И.Рабинович*

В Ge обнаружен предсказанный в [1] резонанс, обусловленный переходами упруго взаимодействующих с примесями электронов между уровнями Ландау различных долин

В многодолинных полупроводниках в квантующих магнитных полях возможен резонанс, связанный с "одновременным" поглощением электроном фотона и упругим, вследствие его взаимодействия с примесью, междолинным переходом. Этот резонанс – междолинный циклотронно-примесный (МДЦПР) – должен происходить на частотах $\omega = (l_2 + \frac{1}{2})\omega_2 - (l_1 + \frac{1}{2})\omega_1$, где $\omega_1, \omega_2, l_1, l_2$ – циклотронные частоты и номера уровней Ландау двух рассматриваемых долин. По природе он аналогичен циклотрон-фононному [2] и междолинному циклотрон-фононному [3] резонансам, но отличается от них тем, что его частота не обусловлена фононным спектром кристалла. Кроме того, коэффициент поглощения $\alpha(\omega)$ для МДЦПР при достаточной концентрации примесей может быть существенно больше [1].

МДЦПР электронов наблюдался нами в Ge на субмиллиметровых волнах ($\lambda = 380 - 1000$ мкм) с помощью спектрометра на лампах обратной волны [4] при температурах $T = 4,2 \div 2$ К в магнитных полях $H = 5 \div 20$ кэ. Исследовались спектры фотопроводимости и поглощения с разверткой H при фиксированных частотах излучения ω для образцов с концентрацией примесей $N_D - N_A = 10^{12} \div 10^{15}$ см⁻³ и $N_A/N_D = 1 \div 5\%$. Концентрация свободных носителей n определялась фоновым излучением теплой части криостата и составляла $\sim 10^9$ см⁻³.

Основные измерения проведены при ориентации $H \parallel [111]$ и постоянном поле смещения $E_0 \perp H$, когда циклотронная масса электронов долины [111] $m_2 = 0,0815 m_0$ примерно в 2,5 раза меньше циклотронной массы электронов $m_1 = 0,2 m_0$ остальных эквивалентных долин. На рис. 1 для этой ориентации показаны некоторые наиболее интенсивные переходы. Здесь 1, 2 соответствуют ЦР электронов, 3–6 – МДЦПР. Исследовался переход №3, так как переходы 4 и 5 близки к ЦР, а переход 6 требует $H > 100$ кэ.

На рис. 2 для примера приведен спектр фотопроводимости образца с $N_D - N_A \sim 3 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Наиболее интенсивной линией в спектре является линия ЦР, соответствующая переходу 2 рис. 1. Искомый переход 3 (МДЦПР) должен иметь резонансное магнитное поле $H_{рез} = 0,77 H_{ЦР}$. Из рис. 2 видно, что ему соответствует пик А, воспроизведенный на том же рисунке дополнительно и в большем масштабе. Кроме него наблюдается несколько линий примерно той же интенсивности. Поэтому требуется детальный анализ для уверенной идентификации линий спектра.

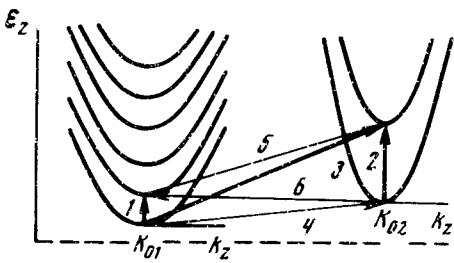


Рис. 1. Энергетические уровни электронов в Ge в квантующем магнитном поле $H \parallel \langle 111 \rangle$ стрелки показывают некоторые возможные переходы

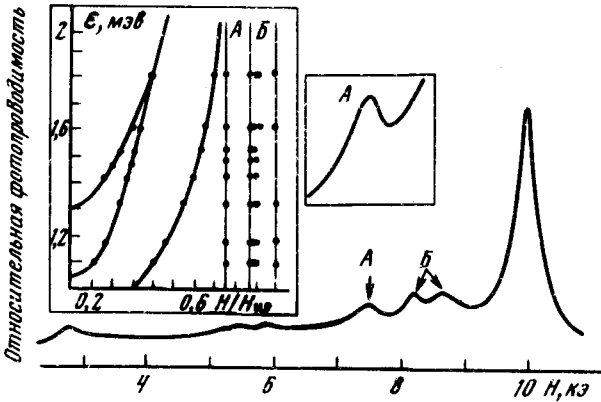


Рис. 2. Спектр фотопроводимости образца с $N_g - N_a = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. На вставке — зависимости энергий наблюдаемых переходов от $H/H_{\text{ЦР}}$; $H_{\text{ЦР}}$ — поле циклотронного резонанса "легких" электронов (переход 2 (рис. 1)).

Известно, что в Ge в этой области ω и H возможны линии, обусловленные гармониками ЦР свободных электронов [5] и зеемановскими переходами электронов между возбужденными состояниями мелких доноров [4]. На вставке рис. 2 приведены зависимости энергии ϵ всех наблюдаемых нами переходов при $T = 4,2 \text{ K}$ от $H/H_{\text{ЦР}}$. Зависимости $\epsilon(H/H_{\text{ЦР}})$ для гармоник ЦР, как и для ЦР и МДЦПР, должны быть вертикалями; при характерных для гармоник значениях H таких нет. Зависимости с переменным наклоном соответствуют зеемановским компонентам, имеющим при $H = 0$ энергии $0,71; 1,05$ и $1,31 \text{ мэВ}$ [4]. Пик A , наблюдающийся в хорошем соответствии с теорией при $H = 0,76 \pm 0,77 H_{\text{ЦР}}$ мы относим к МДЦПР. Серия линий B наблюдается при $H > 0,82 H_{\text{ЦР}}$, т. е. отстоит от $H_{\text{рез}}$ на величину, существенно превышающую возможные ошибки ориентации, измерения H и прочее. Эта серия соответствует переходам между высокими возбужденными состояниями мелких доноров, для которых в этой области магнитных полей зависимость $\epsilon(H)$ определяется нелинейным эффектом Зеемана и похожа на зависимость ЦР.

В пользу правильности определения природы пика A можно привлечь еще ряд факторов. Температурные исследования спектров фотопроводимости показывают, что с понижением температуры интенсивность линии A увеличивается по сравнению с остальными линиями в спектре. Эта линия не наблюдается в спектре для чистых образцов ($N_D - N_A \sim \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$) и растет с увеличением N_D . Все остальные линии наблюдаются как в чистых, так и в легированных образцах. При исследовании

спектров поглощения даже легированных образцов была обнаружена лишь линия, обязанная ЦР (поглощение ad для ЦР составляло $\sim 10^{-3}$, где d — толщина образца).

Приведенные результаты подтверждают, что пик A соответствует МДЦПР. Действительно интенсивность МДЦПР должна расти с понижением T и ростом N_D , в отличие от интенсивности примесных линий при их индикации по фотопроводимости [1, 4]. Отсутствие в спектрах поглощения МДЦПР и примесных линий неудивительно: оценки поглощения для МДЦПР и примесных линий в наших образцах дают значение $ad < 10^{-5}$, чувствительность же использованного нами спектрометра [4] составляла $10^{-5} - 10^{-4}$. Различие в интенсивностях линий МДЦПР и ЦР в спектрах фотопроводимости и поглощения связано с тем, что механизмы фотопроводимости для этих резонансов различны. Фотопроводимость при ЦР свободных электронов возникает вследствие разогрева электронов и связанного с ним незначительного изменения n или μ (μ — подвижность) при поглощении излучения. Фотопроводимость при МДЦПР обусловлена тем, что электроны переходят из долин с компонентой тензора подвижности μ_{1E} в долину с $\mu_{2E} \approx 30\mu_{1E}$ [6]. Вследствие этого отношение интенсивностей пиков МДЦПР и ЦР в спектрах фотопроводимости должно быть значительно больше, чем в спектрах поглощения.

Убедительным аргументом в пользу правильности проведенной идентификации могут служить измерения анизотропии эффекта.

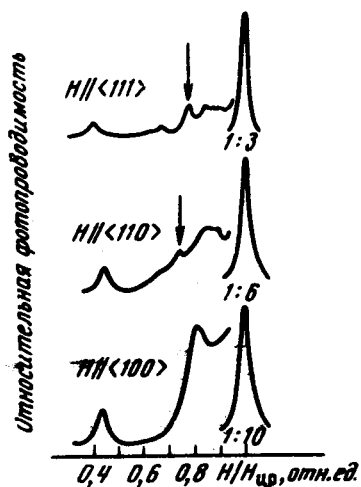


Рис. 3. Спектры фотопроводимости легированного образца Ge при различных ориентациях H . Стрелки указывают расчетные значения $H/H_{\text{ЦР}}$ для пика МДЦПР; дробь под пиком ЦР — масштаб его по отношению к остальным пикам в спектре

На рис. 3 приведены спектры фотопроводимости для легированного образца при различных ориентациях H относительно кристаллографических осей. Видно, что при $H \parallel [100]$ линия, отнесенная нами к МДЦПР, в спектре отсутствует. Этого и следовало ожидать, так как при $H \parallel [100]$ все энергетические долины зоны проводимости эквивалентны и МДЦПР наблюдаться не должен. При $H \parallel [110]$ линия МДЦПР, в соответствии с теорией, смещается по отношению к $H \parallel [111]$ в область меньших значений $H/H_{\text{ЦР}}$; ее интенсивность уменьшается, так как в этом случае отношение подвижностей электронов в "конечных" и "начальных" долинах меньше, чем при $H \parallel [111]$ [6].

В заключение следует отметить, что в наших экспериментах гармоника ЦР, которые по оценкам должны иметь сопоставимые с МДЦПР значения ad , не наблюдаются, по-видимому, именно потому, что соответствующие им переходы происходят в пределах одной долины и их вклад в фотопроводимость мал.

Авторы благодарны Ю.А. Гурвичу за полезные дискуссии.

Московский
педагогический институт
им. В.И.Ленина

Поступила в редакцию
29 июня 1976 г.

Литература

- [1] Р.И.Рабинович. ФТП, **8**, 91, 1974.
 - [2] Ф.Г.Басс, И.Б.Левинсон. ЖЭТФ, **49**, 914, 1965.
 - [3] R. Vakanas, Y. Levinson, F. Bass. Phys. Lett., **28A**, 604, 1969.
 - [4] Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, Н.Г.Птицина. ЖЭТФ, **64**, 587, 1973;
Е.М.Гершензон, Л.А.Орлов, Н.Г.Птицина. Письма в ЖЭТФ, **22**, 207, 1975.
 - [5] Ю.А. Гурвич. ЖЭТФ, **61**, 1120, 1971.
 - [6] И.М.Цидильковский, В.П.Широковский. ФММ, IX, 321, 1960.
-