

*Письма в ЖЭТФ, том 16, вып. 3, стр. 120 – 124.*

*5 августа 1972 г.*

**ОСЦИЛЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ  
ФЕРМИ-ЖИДКОСТИ В ГЕРМАНИИ В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

*В. С. Багаев, Т. И. Галкина, Н. А. Пенин,  
В. Б. Стопачинский, М. Н. Чураева*

При наложении магнитного поля в твердых телах возникает целый ряд резонансных эффектов (циклотронный резонанс, эффект Шубникова – де – Гааза, осцилляции магнетопоглощения и проч.), дающих наиболее полную информацию о зонном спектре твердых тел.

Нами обнаружен новый резонансный эффект – осцилляции рекомбинационного излучения германия в условиях фазового перехода при образовании электронно-дырочных капель [1] из газа свободных экситонов.

Исследовалось рекомбинационное излучение кристаллов чистого германия ( $N_A + N_D \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), ориентированных по осям  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$  вдоль направления магнитного поля. Криостат, сконструированный специально для оптических измерений на установке "Соленоид" ФИАН<sup>1)</sup>, позволял использовать светосильную оптику как для возбуждения рекомбинационного излучения (лазер He – Ne), так и для собирания излучения. В результате при записи спектров излучения спектральная ширина щели составляла  $5 \cdot 10^{-4} \text{ эв}$ . При регистрации интегральной интенсивности излучения в функции магнитного поля применялся двухкоординатный самописец.

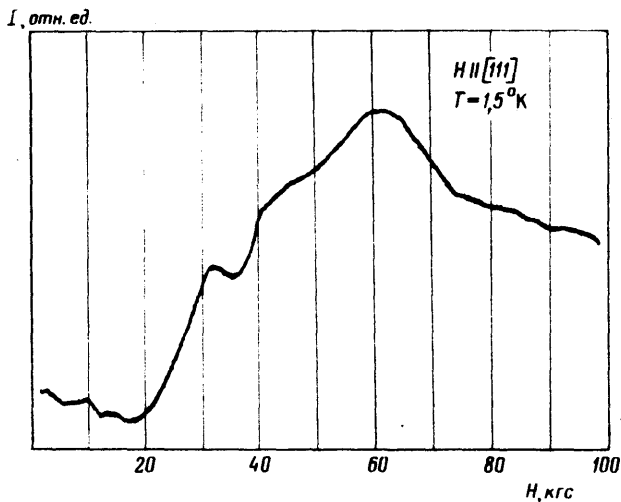


Рис. 1. Зависимость интегральной интенсивности излучения от величины магнитного поля при  $H \parallel \langle 111 \rangle$  и  $T = 1,5^\circ \text{K}$

Так же, как для ориентации  $\langle 100 \rangle$  [2], было обнаружено расщепление линии излучения  $E_k$  электронно-дырочных капель и для двух других ориентаций образцов, причем величина расщепления  $\Delta$  во всех случаях значительно превышала  $kT$ , (например, при 60 кГс для  $H \parallel \langle 110 \rangle$   $\Delta \approx 1,5 \text{ мэв}$ ).

При регистрации интегральной интенсивности излучения, когда спектральная ширина щели полностью захватывала линию  $E_k$  с учетом изменения ее энергетического положения, обнаружены осцилляции этого излучения в функции магнитного поля рис. 1, 2, 3. Для ориентации  $\langle 100 \rangle$ , где движение электронов во всех четырех долинах описывается одной циклотронной массой  $m_c = 0,13 m_0$ , удалось из периода по обратному полю ( $\Delta(1/H)$ ) определить энергию Ферми  $\mathcal{E}_F$  и соответ-

<sup>1)</sup> Пользуемся случаем выразить признательность В.Г.Веселаго за предоставление возможности работать на установке "Соленоид".

ствующую ей равновесную концентрацию носителей в капле  $n_0 = p_0 \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что хорошо согласуется с другими экспериментальными данными [3] и теоретическими расчетами [4]. На рис. 2 экспериментальная зависимость  $I = f(H)$  представлена в совокупности с теоретическими значениями квантования Ландау для электронов и дырок. Дырочный веер уровней Ландау строился в соответствии с работой [5].

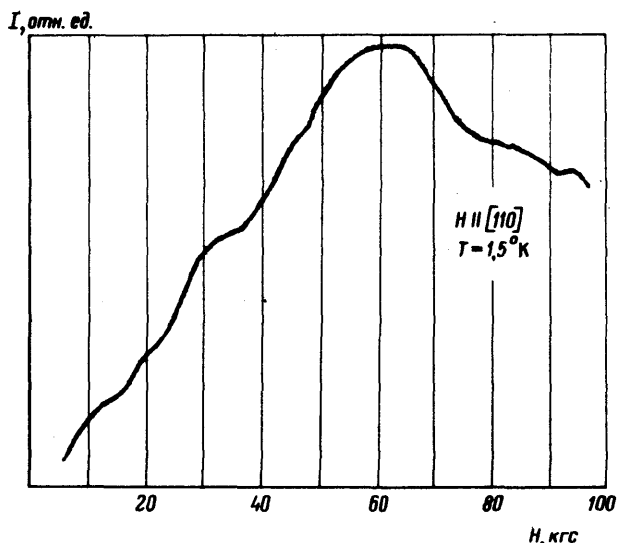


Рис. 2. Зависимость интегральной интенсивности излучения от величины магнитного поля при  $H \parallel \langle 110 \rangle$  и  $T = 1,5^\circ \text{K}$

Наблюдаемые минимумы зависимости  $I = f(H)$  объясняются осцилляциями энергии Ферми электронов, обусловленными квантованием Ландау вырожденной плазмы в электронно-дырочных каплях.

Действительно, при прохождении уровня Ферми через уровень Ландау энергия Ферми возрастает, что должно привести к испарению электронно-дырочных капель, так как уменьшается эффективная "работа выхода" из капли в газ свободных экситонов.

Очевидно, что в малых полях осцилляции интегральной интенсивности связаны именно с электронами, а не с дырками, так как для дырок в малых полях уровень Ферми проходит через уровни Ландау с большими квантовыми числами  $n$ .

Осцилляции интегральной интенсивности излучения не могут быть объяснены излучательной рекомбинацией свободных носителей, находящимися в разрешенных зонах: а) линия  $E_k$  сдвинута относительно края зоны на 8 мэв, б) при прохождении уровней Ландау через уровень Ферми полное число частиц не меняется; таким образом интегральная интенсивность излучения непрямого полупроводника, для которого нет правил отбора для междузонных переходов, не должна осциллировать в функции от магнитного поля.

Для ориентации  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  картина усложнена из-за существования двух семейств подзон Ландау в зоне проводимости, описываемых двумя различными циклотронными массами для электронов.

Из рис. 1 и 2 видно, что наблюдается падение интенсивности излучения для случая  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 110 \rangle$  при  $H \sim 60 - 65$  кГс, а для случая  $\langle 100 \rangle$  — при  $H \sim 30$  кГс. Можно полагать, что при приближении уровня Ферми к нулевому уровню Ландау, существенным становится спиновое расщепление, а, следовательно, и спиновая ориентация электронов. Как следствие, уменьшается плотность состояний, что приводит к уменьшению равновесной концентрации в капле [6], в результате чего падает интегральная интенсивность излучения.

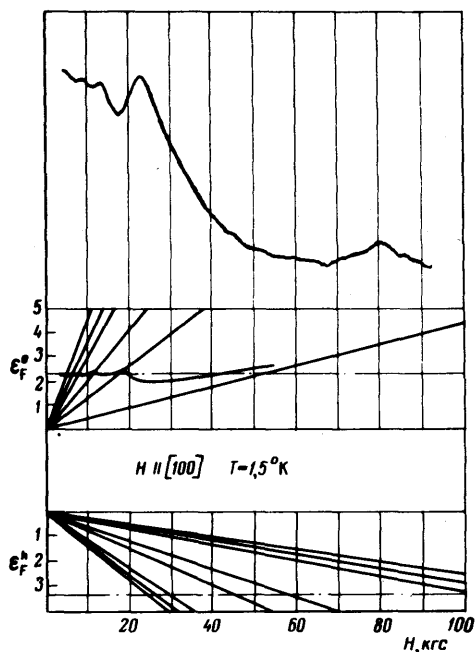


Рис. 3. Осцилляции интегральной интенсивности излучения в зависимости от величины магнитного поля для случая  $H \parallel \langle 100 \rangle$  при  $T = 1,5^\circ\text{K}$ . В нижней части рисунка представлена энергетическая диаграмма квантования Ландау в зоне проводимости и в валентной зоне (согласно работе [5]), а также осцилляции  $\mathcal{E}_F^{\pm}$  при  $n_0 \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , объясняющие минимумы интенсивности излучения.  $\mathcal{E}_F^{\pm}$  (при  $H = 0$ ) = 2,3 мэв

При повышении температуры до  $4,2^\circ\text{K}$  мы не получали такого падения интенсивности для ориентации  $\langle 111 \rangle$ , так как  $kT$  становится  $g\beta H \approx 10^{-3} \text{ эв}$ , и температура затрудняет спиновую ориентацию; осцилляционная структура при  $4,2^\circ\text{K}$  также становится размытой. Заметим также, что при повышении температуры до  $6 - 8^\circ\text{K}$ , когда при  $H = 0$  линия  $E_k$  отсутствует, наложение магнитного поля приводит к "возгоранию" линии  $E_k$ , так как с увеличением  $H$  возрастает энергия связи экситона и соответственно увеличивается  $T_{\text{крит}}$  образования жидкой фазы.

Авторы благодарят Л.В.Келдыша за постоянный интерес к работе и ценные советы и С.П.Гришечкину за полезное обсуждение.

## Литература

- [ 1 ] Л.В.Келдыш. Труды IX Международной конференции по физике полупроводников. Л., изд-во Мир, 1969; УФН, **100**, 3, 514, 1970.
  - [ 2 ] А.С.Алексеев, В.С.Багаев, Т.И.Галкина, О.В.Гоголин, Н.А.Пенин, А.Н.Семенов, В.Б.Стопачинский. Письма в ЖЭТФ, **12**, 203, 1970.
  - [ 3 ] Ja. Pokrovsky, A.Kaminsky, K.Svistunova. Proc. X Intern. Conf. on the Phys.of Semicond. Cambridge, Massachusetts, 505, 1970.
  - [ 4 ] W.F.Brinkman, T.M.Rice, P.W.Anderson, S.T.Chui. Phys. Rev. Lett., **28**, 961, 1972.
  - [ 5 ] J.Halpern, B.Lax. J. Phys. Chem. Sol., **26**, 911, 1965.
  - [ 6 ] В.С.Багаев, Т.И.Галкина, О.В.Гоголин, Л.В.Келдыш. Письма в ЖЭТФ, **10**, 309, 1969.
-