

## ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС ГОРЯЧИХ ДЫРОК ГЕРМАНИЯ В ПОСТОЯННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ $E \perp H$

*В.И.Гавриленко, Е.П.Додин, З.Ф.Красильник,*

*Ю.Н.Ноздрин, М.Д.Чернобровцева*

Впервые исследованы спектры циклотронного резонанса (ЦР) горячих дырок Ge в постоянном электрическом поле  $E \perp H \parallel [001]$  на длине волны  $\lambda = 1,65$  мм. Обнаружены перенаселенность и эффекты непараболичности зоны легких дырок, отсечка ЦР легких дырок при  $E > 500$  В/см, возникновение четных гармоник ЦР тяжелых дырок.

1. Интерес к эффектам горячих дырок германия<sup>1-5</sup> вызван возможностью достижения отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) в диапазоне длин волн  $2 \text{ мм} \gtrsim \lambda \gtrsim 0,05$  мм, связанной с инверсией тяжелых дырок по энергии циклотронного вращения в  $E \perp H$  и  $E \parallel H$  полях<sup>6,7</sup> (классический аналог инверсии по уровням Ландау) и с инверсией прямых оптических переходов между тяжелой и легкой подзонами, возникающей в  $E \perp H$  полях и сопровождающейся увеличением концентрации легких дырок по сравнению с равновесным значением<sup>8</sup>. Обширная информация о свойствах дырок в сильных электрическом и магнитном полях может быть получена методом циклотронного резонанса (ЦР), который позволяет исследовать отдельно легкие и тяжелые дырки, определить их концентрации и времена релаксации в постоянном электрическом поле<sup>9</sup>, выявить эффекты, обусловленные сложным законом дисперсии и, наконец, определить поглощение германия в условиях, когда можно ожидать ОДП на ЦР.

В данной работе излагаются первые результаты ЛОВ спектроскопии на ЦР горячих дырок в Ge (Ga) на длине волны  $\lambda = 1,65$  мм при  $T \cong 10 \div 30$  К в электрических полях до 1 кВ/см

2. В эксперименте измерялось поглощение излучения ЛОВ в  $p$ -Ge во внешних постоянном магнитном и импульсном электрическом полях. Излучение направлялось квазиоптическим трактом на прямоугольный образец, вырезанный по кристаллографическим осям типа  $[100]$  и размещенный в гелиевом криостате в центре сверхпроводящего соленоида ( $p \cong \cong 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_A + N_D \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Плоскость образца  $4,7 \times 4,7 \text{ мм}^2$  была ориентирована перпендикулярно магнитному полю и волновому вектору излучения. Прикладываемый к противоположным торцам  $4,7 \times 0,7 \text{ мм}^2$  импульс напряжения ( $\tau_{\text{имп}} = 10 \text{ мкс}$ ,  $f_{\text{повт}} = 3,3 \text{ Гц}$ ) вызывал ионизацию акцепторов<sup>1)</sup>, что приводило к модуляции излучения ЛОВ, проходящего через образец. Сигнал с приемника из  $n$ -InSb, расположенного под образцом, преобразовывался строб-интегратором и регистрировался самописцем. Накопление сигнала на строб-интеграторе происходило в момент поступления строб-импульса, синхронизованного с импульсом напряжения.

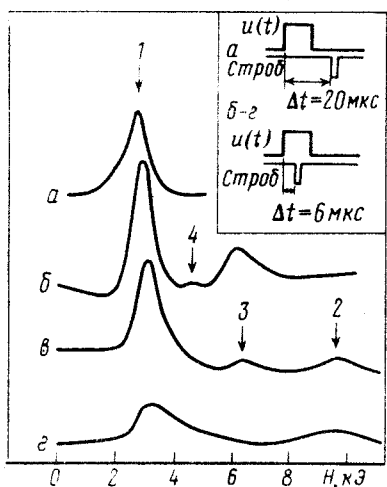


Рис.1

Рис.1. Спектры ЦР в  $p$ -Ge в скрещенных  $E \perp H$  полях. Стрелками указаны легкие дырки (1), вторая – четвертая гармоники ЦР тяжелых дырок ( $2 \div 4$ ).  $u/l$ , В/см: а – 0 ( $T = 30 \text{ К}$ ), б – 90, в – 330, г – 780

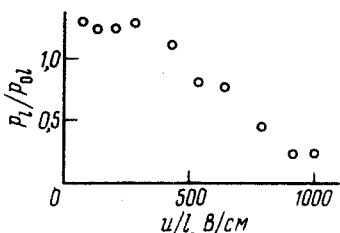


Рис.2

Рис.2. Зависимость концентрации "замagnetизированных" легких дырок от электрического поля;  $p_0, p_1$  – концентрации термоионизированных легких дырок при  $T = 30 \text{ К}$

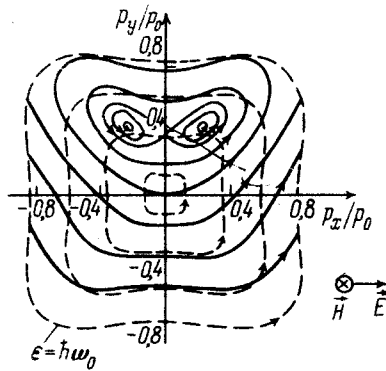


Рис.3

Рис.3. Траектории свободного движения тяжелых дырок в плоскости  $p_z = 0$  импульсного пространства в области энергий  $\epsilon < \hbar\omega_0$ :  $H \parallel [001]$ ,  $E \parallel [100]$ ,  $E/H = 0,1 \text{ В/см} \cdot \text{Э}$ . Пунктир –  $E = 0$ .  $p_0 = (2m_h \hbar\omega_0)^{1/2}$ , где  $m_h = 0,32 m_0$

3. Характерные спектры ЦР представлены на рис.1. Спектр а – это спектр равновесных дырок, он получен в условиях, когда строб-импульс следовал непосредственно за импульсом напряжения  $u/l = 1300 \text{ В/см}$  ( $l = 0,47 \text{ см}$  – длина образца), нагревающим решетку до  $T \cong 30 \text{ К}$  (по оценке для адиабатического разогрева), так что практически все акцепторы оставались ионизованными (см. вставку на рис.1)<sup>2)</sup>. Спектры б – г получены при

1) Известно, что при  $T = 4,2 \text{ К}$  практически полная ионизация мелких примесей в  $p$ -Ge ( $p \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) происходит в полях  $E \sim 20 \div 40 \text{ В/см}$  (см., например,<sup>1)</sup>).

2) Характерное время термализации дырок по окончании импульса поля составляет  $\leq 10^{-8} \text{ с}$ . Последующее остывание образца и, соответственно, вымораживание дырок происходило за время  $\geq 10^{-3} \text{ с}$ . Концентрация дырок после действия импульса поля зависела от энергии, вносимой электрическим полем в образец, и для импульсов длительностью 10 мкс насыщалась при  $u/l > 900 \text{ В/см}$ , что контролировалось по ЦР.

совмещении во времени обоих импульсов. Это позволяет оценить отношение числа легких дырок при  $u = 0$  ( $p_{0,l}$ ) и  $u \neq 0$  ( $p_l$ ) учитывая, что интегральная интенсивность линии ЦР пропорциональна концентрации дырок  $\int I(H) dH \sim p$ .

Обнаружено, что уже начиная с умеренных электрических полей  $u/l \sim 100$  В/см, концентрация легких дырок превышает равновесную  $p_l/p_{0,l} > 1$  (см. рис. 2). Явление перенаселенности в таких полях ранее не обсуждалось и наблюдалось, по-видимому, впервые. Перенаселенность сохранялась вплоть до сильных электрических полей, при которых  $v_c \sim 0,3v_l \sim v_h$  (здесь  $v_c = cE/H$ ,  $v_{l,h} = (2\hbar\omega_0/m_{l,h})^{1/2}$ ,  $m_{l,h}$  — эффективные массы легких и тяжелых дырок,  $\hbar\omega_0$  — энергия оптического фонона). В таких полях перенаселенность обусловлена интенсивным рассеянием тяжелых дырок на оптических фононах, увеличивающим переходы из тяжелых дырок в легкие, в то время как число обратных переходов мало из-за замагниченности легких дырок<sup>9</sup>.

При  $u/l > 500$  В/см наблюдалось падение интенсивности линии (отсечка ЦР), что связано с увеличением доли "размагниченных" дырок, достигающих энергии  $\epsilon = \hbar\omega_0$  за время, меньше периода волны, рассеивающихся на фононе и тем самым не участвующих в ЦР. Это сопровождается уменьшением общего числа легких дырок и исчезновением перенаселенности<sup>9</sup>.

4. С ростом электрического поля отмечалось смещение линии ЦР легких дырок в область больших значений магнитных полей —  $\Delta H/H \sim 20\%$  при  $v_c \sim 0,5v_l$ . Как показывают расчеты, эффект связан с непараболичностью закона дисперсии легких дырок, проявляющейся при разогреве носителей. В сильном электрическом поле часть дырок выносятся в течение периода циклотронного вращения в область энергий  $\epsilon \sim \hbar\omega_0$ , где их масса заметно увеличивается. Циклотронная частота таких дырок при  $v_c = 0,5v_l$  на 8% меньше частоты дырок, вращающихся в области энергий  $\epsilon \sim \frac{3}{2}kT = 0,1\hbar\omega_0$  при  $T = 30$  К,  $E = 0$ . Смещение пика ЦР в электрическом поле вызвано как уменьшением среднего значения  $\omega_c$ , так и изменением формы линии<sup>10</sup> из-за зависимости  $\omega_c$  от осцилляторной энергии дырок. Оценки показывают, что оба эффекта приводят к смещению пика на 15%, если предположить что дырки в результате неупругого рассеяния на оптических фононах локализованы при  $\epsilon < \hbar\omega_0$  в окрестности траектории импульсного пространства, проходящей через  $\epsilon = 0$  (главная траектория). Хорошее согласие оценки с экспериментом можно рассматривать как косвенное свидетельство возникновения при  $u/l > 500$  В/см такого локализованного распределения, являющегося распределением с инверсией по энергии циклотронного вращения<sup>11</sup>.

5. Из спектров, приведенных на рис.1, видно возникновение и рост второй и четвертой гармоник ЦР тяжелых дырок и уменьшение интенсивности третьей гармоники с увеличением электрического поля. Как известно, при  $H \parallel [001]$ ,  $E = 0$  в спектре ЦР тяжелых дырок, характеризующихся анизотропным законом дисперсии, присутствуют лишь нечетные гармоники, что связано с симметрией четвертого порядка траекторий свободного движения — рис.3. Во внешнем поле  $E \parallel [100]$  такая симметрия нарушается, меняется интенсивность нечетных гармоник, возникают четные гармоники циклотронного вращения, проявляется неизохронность циклотронного вращения дырок<sup>7,12</sup>. Четные гармоники возникали в эксперименте уже при небольших скоростях дрейфа  $v_c \sim 0,1v_h$  — см. рис.1. При  $v_c > 0,5v_h$  сказывалась неизохронность вращения дырок — вторая гармоника ЦР тяжелых дырок смещалась в область больших магнитных полей на 10% при  $v_c = 0,45v_h$ .

Представляет значительный интерес дальнейшее исследование ЦР горячих дырок на более чистых образцах Ge. Можно ожидать, что при достижении инверсии по энергии циклотронного вращения неизохронность вращения дырок (из-за непараболичности  $\epsilon(p)$  — для легких дырок, или анизотропия  $\epsilon(p)$  — для тяжелых дырок) приведет к ОДП на ЦР в скрещенных  $E \perp H$  полях.

Авторы благодарны А.А.Андронову за постоянный интерес к работе и многочисленные дискуссии, а также В.Н.Мурзину, А.П.Чеботареву и В.Н.Шастину за обсуждение результатов.

## Литература

1. *Kotiyata S., Spies R.* Phys. Rev., 1981, **B23**, 6839.
2. *Валов В.А., Козлов В.А., Мазов Л.С., Нефедов И.М.* Письма в ЖЭТФ, 1981, **33**, 608.
3. *Воробьев Л.Е., Осокин Ф.И., Стафеев В.И., Тулупенко В.Н.* Письма в ЖЭТФ, 1981, **34**, 125.
4. *Иванов Ю.Л.* Письма в ЖЭТФ, 1981, **34**, 539.
5. *Гавриленко В.И., Мурзин В.Н., Стоклицкий С.А., Чеботарев А.П.* Письма в ЖЭТФ, 1982, **35**, 81.
6. *Андронов А.А., Додин Е.П., Красильник З.Ф.* ФТП, 1982, **16**, 212.
7. *Андронов А.А., Гавриленко В.И., Додин Е.П., Красильник З.Ф., Чернобровцева М.Д.* Препринт ИПФ АН СССР №40, Горький, 1982.
8. *Андронов А.А., Козлов В.А., Мазов Л.С., Шастин В.Н.* Письма в ЖЭТФ, 1979, **30**, 585.
9. *Восиллюс И.И., Левинсон И.Б.* ЖЭТФ, 1966, **50**, 1660; *Восиллюс И.И.* ФТТ, 1969, **11**, 924.
10. *Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К.* Изв. высш. уч. зав., сер. Радиофизика, 1967, **10**, 1414.
11. *Андронов А.А., Валов В.А., Козлов В.А., Мазов Л.С.* ФТТ, 1980, **22**, 1275.
12. *Андронов А.А., Додин Е.П., Коробков Г.М., Красильник З.Ф., Чернобровцева М.Д.* Тезисы докл. X совещания по теории полупроводников. Новосибирск, 1980, стр.29.

Институт прикладной физики  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
18 марта 1982 г.  
После переработки  
8 апреля 1982 г.