

## ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС РАЗОГРЕТЫХ СВЧ ПОЛЕМ ГОРЯЧИХ ДЫРОК В ОДНООСНО ДЕФОРМИРОВАННОМ Ge

*В.Д.Кулаковский, В.А.Тулин, В.Б.Тимофеев*

В кристаллах германия, сжатых вдоль осей  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$ , обнаружен циклотронный резонанс дырок, разогретых СВЧ полем до энергий, порядка величины деформационного расщепления валентной зоны  $\Delta_v \gg kT$ , в обеих (расщепленных) зонах. Циклотронная масса  $m_c$  "горячих" дырок основной зоны, измеренная при направлении магнитного поля вдоль оси сжатия, совпадает с  $m_c$  тяжелых дырок в недеформированном Ge.

При деформации кристаллов Ge четырехкратно вырожденная валентная зона расщепляется на две двукратно вырожденных по спину. Параметры, необходимые для описания закона дисперсии валентной зоны, бы-

ли получены в работах [1 – 3] при исследовании циклотронного резонанса (ЦР). Из-за взаимодействия расщепившихся зон закон дисперсии  $\epsilon(k)$  для дырок в области энергий порядка величины деформационного расщепления  $\Delta_v$  сильно отличается от квадратичного [4]. В этой области энергий можно ожидать нелинейного поведения отклика системы свободных носителей на воздействие сильного электромагнитного поля при температурах  $T \ll \Delta_v/k$ .

Нами изучался ЦР дырок в одноосно сжатых кристаллах Ge при различных уровнях мощности высокочастотного поля и плотностей возбуждения неравновесных носителей ( $n_{e,h}$ ). Эксперимент выполнялся при  $T = 1,27\text{K}$ , однако, качественно картина не изменялась и при  $T = 4,2\text{K}$ . Наблюдение ЦР выполнялось в трехсантиметровом диапазоне СВЧ излучения. В качестве поглощающей ячейки использовался полосковый резонатор. Образец в виде прямоугольного параллелепипеда  $0,5 \times 2 \times 8 \text{ см}^{-3}$  размещался параллельно полоске в пучность электрического поля. Неравновесные носители возбуждались в центре образца с помощью лазера на алюмоиттриевом гранате (1,06 мкм). Для осуществления деформации (вдоль наибольшей оси) образец зажимался в миниатюрные капроновые тисочки при комнатной температуре. При охлаждении до гелиевой температуры величина деформации кристалла заметно возрастала из-за различных коэффициентов теплового расширения Ge и капрона. Контроль величины и однородности деформации производился по спектру излучения экситонов при  $T = 4,2\text{K}$ . Величина расщепления валентной зоны в наших экспериментах составляла 4 – 5 мэВ.

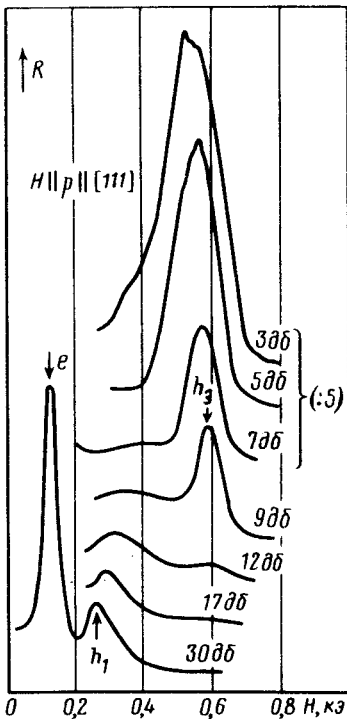


Рис. 1. Спектры ЦР сжатого вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  Ge при фиксированной лазерной подсветке и различных мощностях СВЧ поля. Максимальная мощность СВЧ поля  $\sim 30$  мВт,  $e$  – электроны,  $h_1, h_2, h_3$  – дырки

Измерения СВЧ поглощения выполнялись по схеме на проход. Для поддержания постоянства СВЧ мощности, поступающей в приемник, в

СВЧ тракте использовались два аттенюатора (до и после резонатора). В условиях эксперимента электрическое СВЧ поле было перпендикулярно плоскости, в которой вращалось постоянное магнитное поле  $H$ . Поэтому вероятность ЦР поглощения не зависела от направления  $H$ . Спектры ЦР недеформированного и одноосно сжатого Ge в слабых СВЧ полях при малой плотности возбуждения  $n_{e,h} \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  хорошо согласовались с известными из литературы [3]. Зависимость спектров ЦР от СВЧ мощности исследовалась при различных  $n_{e,h}$ . Описанные ниже особенности наиболее отчетливо проявлялись при  $n_{e,h} \sim 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Максимальная СВЧ мощность в резонаторе составляла 100 мВт.

На рис. 1 показана эволюция линии поглощения дырок в спектре ЦР при увеличении мощности СВЧ поля. Вначале линия ЦР дырок  $h_1$  сильно уширяется, а ее максимум сдвигается в сторону больших полей. Этот результат согласуется с наблюдениями Хенсела и Фейера [3] и связан с ростом циклотронной массы дырок по мере увеличения их энергии из-за разогрева СВЧ полем [3]. Однако при некоторой мощности ( $\sim 12$  дБ), когда положение пика  $h_1$  изменилось не более, чем на 20%, возникает новая линия поглощения  $h_3$  в большем поле  $H$ , соответствующем положению ЦР дырок с массой, близкой к циклотронной массе тяжелых дырок в недеформированных кристаллах Ge. При дальнейшем увеличении СВЧ мощности интенсивность линии  $h_3$  сначала быстро возрастает (рис. 1), а затем она уширяется, в основном, в сторону меньших полей, и сильное СВЧ поглощение простирается на всю область  $H < H(h_3)$ . Поскольку мы не будем касаться здесь исследований ЦР в самых больших СВЧ полях, соответствующие спектры не приведены.

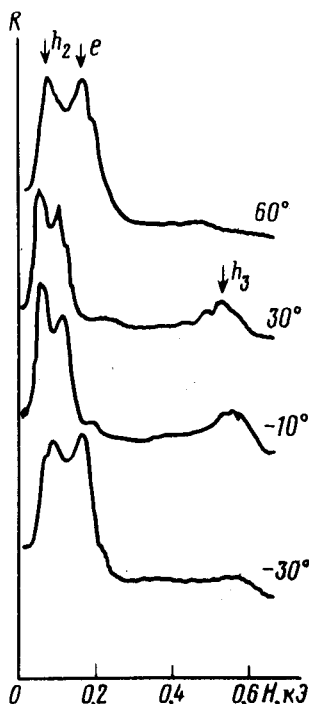


Рис. 2. Угловая зависимость спектров ЦР сжатого вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  Ge при  $n_{e,h} \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и мощности СВЧ поля  $\sim 10$  мВт. Числа у спектров — угол между  $H$  и  $P$ .  $P$  — напряжение сжатия

В спектре ЦР, одновременно с линией  $h_3$ , появляется резонансное поглощение вблизи ЦР электронов ( $e$ ), проявляющееся при плотности

возбуждения  $n_{e,h} \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  в виде отдельной узкой линии  $h_2$  (рис. 2). Мы измерили угловую зависимость положения линий  $h_2$  и  $h_3$  (рис. 3). Оказалось, что для линии  $h_2$  эта зависимость совпадает с расчетом для дырок на дне отщепленной зоны, если при этом воспользоваться известными зонными параметрами  $A = -13,38$ ,  $D = -19,8$  [1]  $m_{\perp}^{-1} = A + \frac{D}{2\sqrt{3}}$  и  $m_{\parallel}^{-1} = A - \frac{D}{\sqrt{3}}$  [4]. Таким образом, благодаря разог-

реву дырок СВЧ полем, можно непосредственно измерить эффективные массы дырок не только в основной, но и в отщепленной зонах.

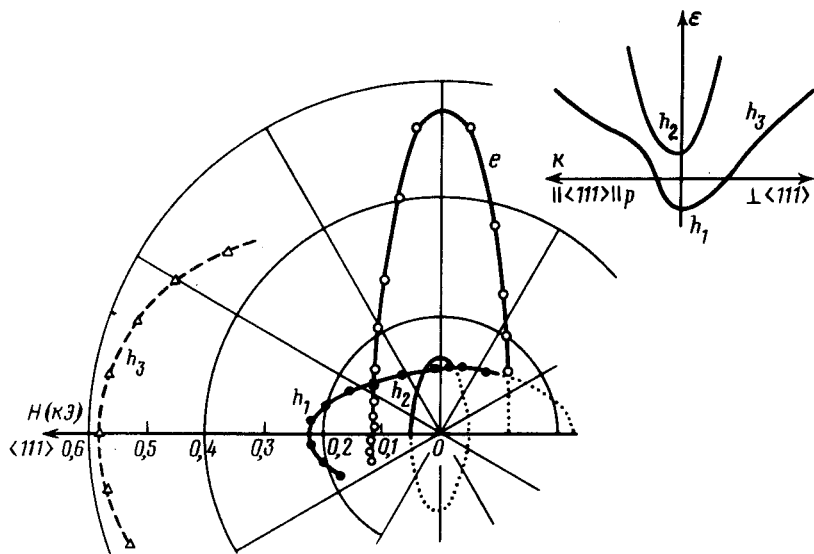


Рис. 3. Угловая зависимость циклотронных масс электронов ( $e$ ) и дырок  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$  в сжатом вдоль  $\langle 111 \rangle$  Ge. Пунктиром показана угловая зависимость циклотронной массы тяжелых дырок в недеформированном Ge. На вставке приведена качественная картина спектра  $\epsilon(k)$  валентной зоны в сжатом Ge [4]

Появление линии  $h_3$  в спектре ЦР свидетельствует о том, что дырки разогреваются СВЧ полем до энергий порядка величины деформационного расщепления валентной зоны (в нашем случае  $\Delta_v \sim 5$  мэВ). Естественно предположить, что линия  $h_3$  обусловлена ЦР "горячих" дырок с энергией  $\epsilon \gtrsim \Delta_v$  в основной дырочной зоне. Аналогичная линия видна и в кристаллах, сжатых вдоль оси  $\langle 100 \rangle$  при  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{P}$ . В обоих случаях ( $\mathbf{P} \parallel \langle 111 \rangle$  (рис. 2) и  $\mathbf{P} \parallel \langle 100 \rangle$ ) при фиксированной мощности СВЧ поля интенсивность линии  $h_3$  быстро уменьшалась при увеличении угла  $\phi$  между  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{P}$  больше  $30^\circ$ . При малых  $\phi$  положение линии  $h_3$  близко к циклотронной массе тяжелых дырок в недеформированном Ge (рис. 3). Исчезновение линии  $h_3$  при углах  $\phi > 30^\circ$ , на первый взгляд, казалось неожиданным, поскольку трудно предположить, что при изменении угла  $\phi$  будет сильно меняться время релаксации дырок или уменьшаться поглощение энергии СВЧ в условиях эксперимента, когда  $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}, \mathbf{P}$ . Однако такое поведение спектра ЦР можно качественно объяснить в рамках имеющихся представлений о поведении системы "го-

рячих" носителей. Обратим внимание, что в условиях нашего эксперимента ЦР для дырок в отщепленной зоне отвечает "холодным" дыркам на ее дне. Это означает, что средняя энергия дырок и в основной зоне не сильно превышает величину расщепления  $\Delta_v$ . При  $H \parallel R$  дырочная орбита лежит в плоскости, перпендикулярной оси сжатия, когда искажение закона дисперсии для дырочной зоны значительно меньше, чем в направлении оси сжатия (см. вставку на рис. 3). Поэтому уже для дырок с  $\epsilon \sim \Delta_v$  при  $H \parallel R$  циклотронная масса близка к циклотронной массе тяжелых дырок. В геометрии  $H \perp R$  этого можно добиться лишь при существенно большем разогреве носителей. Однако при дальнейшем разогреве носителей линии ЦР сильно уширяются.

Таким образом, наблюдаемые особенности в спектрах ЦР являются следствием особенностей в плотности состояний валентной зоны.

Авторы выражают благодарность Е.М.Гершензону и Ю.А.Гурвичу за полезное обсуждение.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
2 ноября 1979 г.

### Литература

- [1] J.C.Hensel. Phys. Rev. Lett., 21, 983, 1968.
  - [2] J.C.Hensel, K.Suzuki. Phys. Rev. Lett., 22, 838, 1969.
  - [3] J.C.Hensel, G.Feher. Phys. Rev., 129, 1041, 1963.
  - [4] Г.Л.Бир, Г.Е.Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М., изд. Наука, 1972, стр. 393.
-