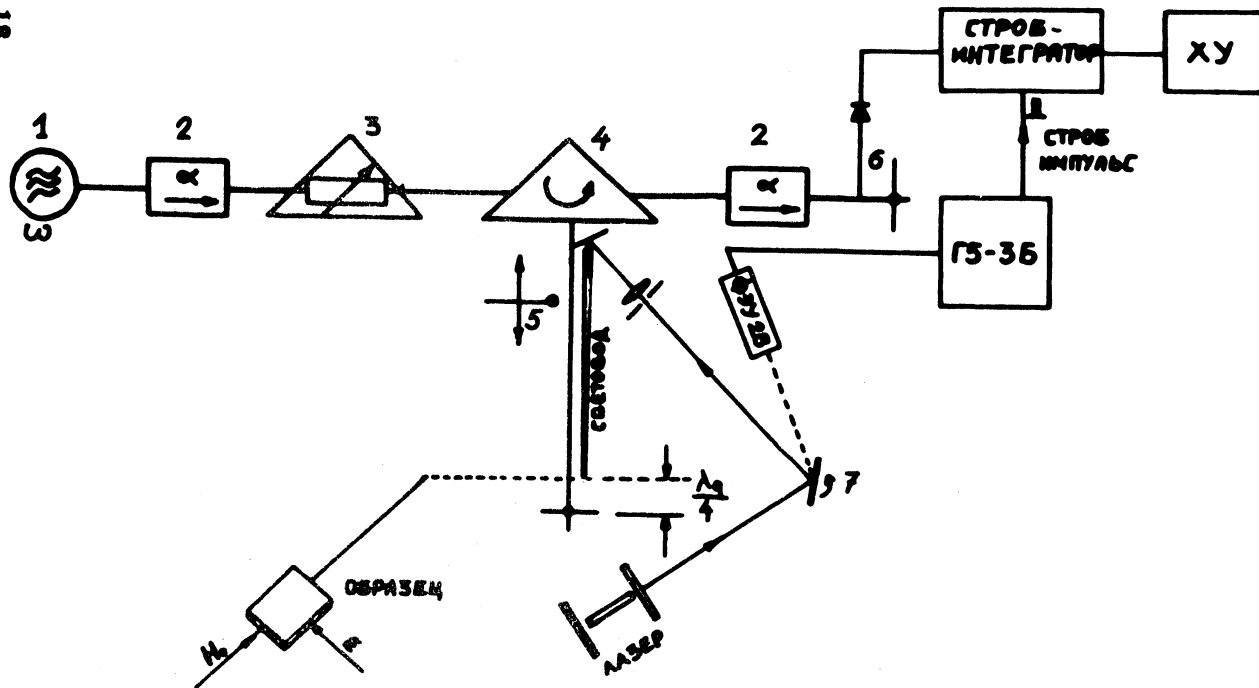


## ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС В ЧИСТОМ ГЕРМАНИИ ПРИ БОЛЬШОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ

П. С. Гладков, В. Б. Гиноман, Б. Г. Журкин,  
В. Г. Михалевич, Н. А. Пенин, Г. П. Шипуло

Целью настоящей работы было исследование циклотронного резонанса в чистом германии при собственной подсветке, создающей концентрации неравновесных носителей тока до  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Это интересно в связи с изучением свойств системы неравновесных носителей при высоких уровнях возбуждения и низких температурах и в частности, свойств "электронно-дырочного конденсата" [1]. Опыты проводились на частоте 8,3 Ггц при температурах 1,8 - 4,2°К. Для генерации носителей заряда применялся гранатовый лазер ( $\lambda = 1,06$  мк) с мощностью 10 вт в непрерывном режиме. С помощью зеркального модулятора создавались импульсы света длительностью 1 - 3 мксек. Применение импульсной методики позволило избежать перегрева образца и проследить спад концентрации неравновесных носителей заряда после прекращения возбуждающего светового импульса. Для этого использовался стробируемый интегратор с регулируемой задержкой стробимпульса относительно светового импульса (0 - 100 мксек). Магнитное поле прикладывалось под углом 60° к оси [100] в плоскости (110) образца толщиной 0,25 мм и размерами 4 x 7 мм<sup>2</sup>, помещаемого в волновод без резонатора. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Оценка концентрации неравновесных носителей производилась по формуле



Р и с. 1. Схема импульсной установки для наблюдения циклотронного резонанса в германии на частоте 9,3 Гц. 1-клистрон; 2-ферритовый вентиль; 3-аттенюатор; 4-циркулятор; 5-импеданс-трансформатор; 6-детектор; 7-зеркальный модулятор.

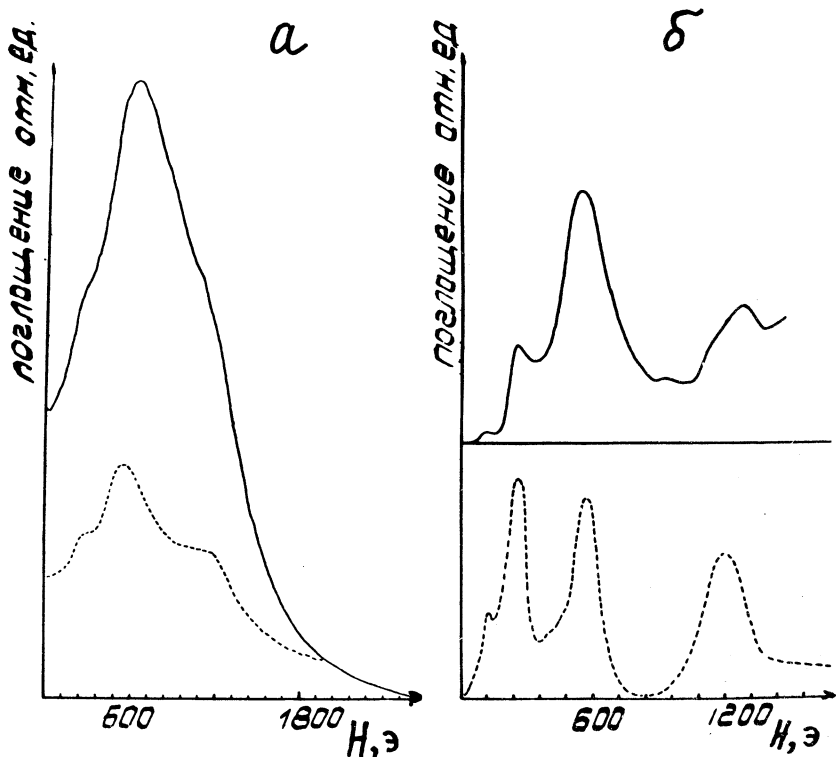
$$\Delta n = \frac{I(1 - R)\Delta t}{h\nu V_{\text{эфф}}}, \quad (1)$$

где  $I$  - мощность излучения, падающего на образец,  $h\nu = 1,17$  эв - энергия кванта излучения,  $R = 0,36$  - коэффициент отражения германия,  $\Delta t$  - длительность импульса излучения,  $V_{\text{эфф}}$  - эффективный объем, в котором в основном сосредоточены неравновесные носители к концу действия импульса. Формула (1) справедлива при  $\Delta t \ll \tau$ , где  $\tau$  - время жизни неравновесных носителей (в нашем случае  $\tau = 20 \cdot 10^{-6}$  сек). Величина  $V_{\text{эфф}}$  определяется объемом, в котором поглощается излучение,  $V_1 = \pi d^2/4\alpha$ , и объемом, который занимают носители к концу действия импульса,  $V_2 = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{D}{\tau}} \Delta t$ .

Здесь  $d$  - диаметр освещенного пятна (0,8 мм),  $\alpha$  - коэффициент поглощения излучения, равный  $7 \cdot 10^3$  см<sup>-1</sup>,  $D$  - коэффициент диффузии носителей, равный  $150$  см<sup>2</sup>/сек. Оценки дают, что  $V_1 \ll V_2 = V_{\text{эфф}} = 3 \cdot 10^{-5}$  см<sup>3</sup>. Поэтому при мощности падающего на образец излучения  $I = 3$  вт концентрация носителей в объеме  $V_{\text{эфф}}$  к концу действия импульса  $\Delta t = 2 \cdot 10^{-6}$  сек составляет  $\sim 5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

На рис. 2 даны спектры резонансного поглощения при накачке порядка  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. На рис. 2а сплошная кривая соответствует отсутствию задержки строб-импульса относительно импульса света, пунктирная кривая соответствует задержке строб-импульса, равной 6 мксек. На рис. 2б сплошная кривая соответствует задержке строб-импульса, равной 15 мксек. Как видно из рис. 2а,б при больших задержках наблюдаются обычные спектры циклотронного резонанса, в то время как при отсутствии задержки строб-импульса наблюдается широкая полоса поглощения с максимумом около  $H = 600$  э, на которой практически не заметны линии циклотронного резонанса.

Из работ /2 - 4/ известно, что при достаточно большой концентрации носителей заряда, такой, что



Р и с. 2. Спектры резонансного поглощения в чистом германии при температурах жидкого гелия при концентрации неравновесных носителей заряда  $\sim 10^{17}$  см $^{-3}$ . а) сплошная кривая - вид спектра при нулевой задержке строб-импульса относительно возбуждающего светового импульса,  $T=1,6^{\circ}\text{K}$ ; пунктирная кривая - вид спектра при задержке строб-импульса, равной 15 мксек,  $T=4,2^{\circ}\text{K}$ ; б) сплошная кривая - вид спектра при задержке строб-импульса, равной 15 мксек,  $T=4,2^{\circ}\text{K}$ ; пунктирная кривая - спектр циклотронного резонанса при концентрации неравновесных носителей заряда  $\sim 10^8$  см $^{-3}$  (непрерывная подсветка),  $T=4,2^{\circ}\text{K}$ .

плазменная частота  $\omega_{\text{п}}$  выше или сравнима с частотой  $\omega$ , на которой ведется эксперимент, необходимо учитывать деполяризующие электрические поля носителей заряда в образце. Это приводит к смещению линий циклотронного резонанса в результате появления магнитоплазменного резонанса. В случае однокомпонентной плазмы (один тип носителей) при концентрации носителей порядка  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  резонансное значение магнитного поля должно составлять  $\sim 10^5$  э. Однако в случае оптического возбуждения в собственной полосе возникают носители двух знаков - дырки и электроны. В случае двухкомпонентной плазмы, образованной электронами и дырками с изотропными эффективными массами, резонансные значения постоянного магнитного поля для магнитоплазменного резонанса даются выражениями /4/

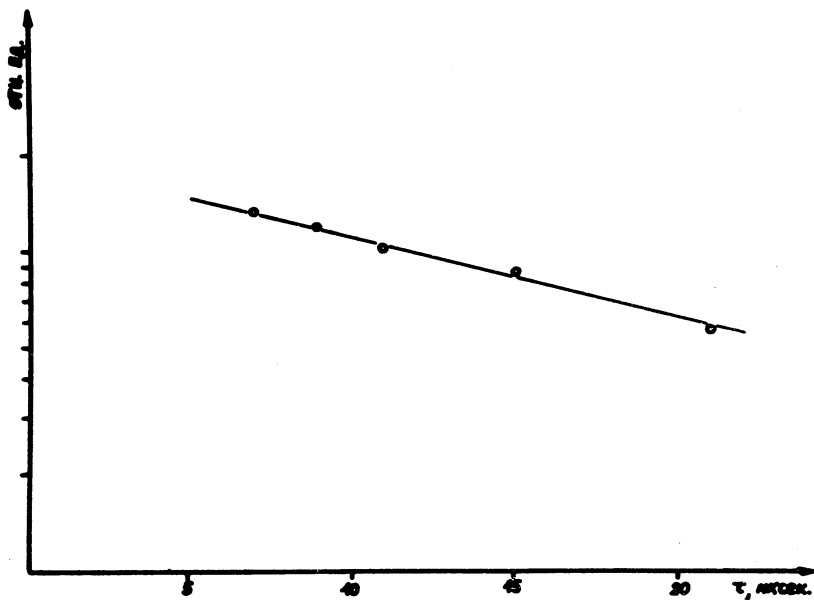
$$H_{01} = - \frac{m_1^* c}{e_1} \left( \frac{\omega_{\text{п1}}^2}{\omega} - \frac{m_1^* \omega_{\text{п2}}^2}{m_2^* \omega} \right) = - \frac{e_1 c L}{(1 + \chi L) \omega} (N_1 - N_2), \quad (2a)$$

$$H_{02} = \frac{m_2^* c \omega}{e_2} \left( \frac{\omega_{\text{п1}}^2 + \omega_{\text{п2}}^2}{\omega_{\text{п1}}^2 - (m_1^*/m_2^*) \omega_{\text{п2}}^2} \right) = \frac{m_2^* \omega c}{e_2} \left[ \frac{N_1/N_2 + m_1^*/m_2^*}{N_1/N_2 - 1} \right], \quad (2b)$$

где  $m_1^*$  и  $m_2^*$  - эффективные массы двух типов носителей заряда,  $\omega_{\text{п1}}$  и  $\omega_{\text{п2}}$  - соответствующие плазменные частоты;  $N_1$  и  $N_2$  - концентрации носителей заряда. Из этих соотношений, справедливых для бесстолкновительной плазмы, видно, что  $H_{01}=0$  независимо от величины эффективных масс носителей заряда, а  $H_{02} = \infty$ . Несмотря на то, что резонансное значение магнитного поля не лежит при  $H=0$ , мы полагаем, что наблюдаемый максимум поглощения при  $H = 800$  эрстед обусловлен в основном магнитоплазменным резонансом двухкомпонентной плазмы. При этом смещение максимума поглощения относительно нулевого магнитного поля, по-видимому, связано с тем, что в реальной ситуации необходимо учитывать столкновения носителей заряда, а

также наличие трех типов носителей (электроны, легкие и тяжелые дырки) и анизотропию их эффективных масс.

Спектр циклотронного резонанса наблюдался вплоть до задержки строб-импульса, равной 35 мксек. Этот результат свидетельствует о том, что время жизни неравновесных носителей заряда в исследуемом образце



Р и с. 3. Зависимость амплитуды линии циклотронного резонанса для тяжелой электронной массы от времени задержки строб-импульса.

при  $T=4,2^{\circ}\text{K}$  составляет несколько десятков микросекунд. С увеличением времени задержки строб-импульса амплитуда линий циклотронного резонанса уменьшается. Для сравнения на рис. 26 приведена запись спектра циклотронного резонанса в случае малой концентрации свободных носителей ( $10^7 - 10^8 \text{ см}^{-3}$ ), полученной при непрерывной подсветке (пунктирная кривая).

На рис. 3 построена зависимость амплитуды линии циклотронного резонанса для одной из электронных масс от времени задержки строб-импульса. Предполагая, что амплитуда линий циклотронного резонанса пропорциональна концентрации неравновесных носителей заряда, можно оценить время жизни этих носителей, которое по нашим оценкам составляет  $\approx 20$  мксек для данного материала.

Очевидно, что эффекты, связанные с коллективными свойствами неравновесных носителей заряда при большом уровне возбуждения, могут иметь место при временах задержек строб-импульса менее 10 мксек, когда наблюдается магнитоплазменный резонанс; при более длинных задержках наблюдается спектр только циклотронного резонанса, характерный для свободных носителей заряда.

Поступила в редакцию  
18 августа 1971 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Л. В. Келдыш. "Коллективные свойства экситонов в полупроводниках". Сб. "Экситоны в полупроводниках", изд-во "Наука", Москва, 1971 г., стр. 5.
2. G. Dresselhaus, A. F. Kip, C. Kittel. *Phys. Rev.*, 100, 618 (1955).
3. R. E. Michel, B. Rosenblum. *Phys. Rev. Letts.*, 7, 234 (1961).
4. R. E. Michel, B. Rosenblum. *Phys. Rev.*, 128, 1646 (1962).