

## О ВОЗМОЖНОСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В НЕРАВНОВЕСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОЙ ПЛАЗМЕ В ГЕРМАНИИ

Б. М. Ашкинадзе, И. М. Фишман

Экспериментально исследованы поглощение и дисперсия СВЧ волны в тонких и массивных образцах чистого германия при поверхностном оптическом возбуждении. Полученные результаты могут быть объяснены с помощью гипотезы, предполагающей возникновение вблизи освещаемой поверхности образца метастабильных сгустков плотной плазмы, релаксирующих в капли электронно-дырочного конденсата.

В настоящем сообщении представлены результаты исследования поглощения и дисперсии волны 8-мм диапазона в оптически возбужденных образцах германия при  $T \leq 4,2\text{K}$ , при одновременной регистрации их рекомбинационного излучения. Эти исследования привели нас к выводу, что в слое образца, вблизи поверхности, может происходить фазовый переход в неравновесной электронно-дырочной плазме (ЭДП), и образуются плазменные сгустки с фиксированной плотностью  $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , которые затем релаксируют в "обычные" капли экситонного конденсата.

Методика эксперимента была подобна изложенной в [1, 2], однако возбуждение образцов производилось светом лазера ЛГ-126 с мощностью 20 мвт, работающего в непрерывном режиме. Свет модулировался на частоте 120 Гц, регистрация всех сигналов осуществлялась по стандартной методике.

На рис. 1 показаны сигналы поглощения и дисперсии в зависимости от накачки. Видно, что при  $I = I_{\text{пор}}$  происходит резкий рост поглощения, а сигнал дисперсии меняет знак. Изменение знака сигнала дисперсии указывает, что в образце появились области плотной плазмы с  $\omega_p = (4\pi n e^2 / \epsilon_0 m^*)^{1/2} \gg \omega$  ( $\omega$  — частота зондирующей волны), которые обладают, как видно из рис. 1, существенным поглощением. Как видно из рис. 2, а, поглощение, возникшее при  $I \geq I_{\text{пор}}$ , слабо зависит от магнитного поля, откуда можно сделать вывод, что оно обусловлено плотной плазмой с  $\omega_p \lesssim 1$ . Однако, наряду с плотной плазмой, имеются области, где плотность носителей невелика. В самом деле, на фоне поглощения с  $\omega_p \lesssim 1$  выделяются линии циклотронных резонансов. Ширина этих линий при  $I < I_{\text{пор}}$  возрастает с накачкой, а при  $I \geq I_{\text{пор}}$  стабилизируется на величине  $\omega_{cp} \approx 18 + 20$ , при 4,2К и  $\approx 30$  при 1,8К. Величина сигнала циклотронного резонанса за вычетом вклада, не зависящего от магнитного поля, так же, как и ширина линий, насыщается при  $I > I_{\text{пор}}$ . Полагая, что величина  $r_p$  в условиях опыта определяется механизмом электронно-дырочного рассеяния [3], можно оценить концентрацию частиц в разреженной плазме:  $(n, p) \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Сигналы дисперсии показаны на рис. 2, б. В слабых магнитных полях при  $I \geq I_{\text{пор}}$  сигнал дисперсии изменяет знак, что свидетельствует

о появлении в образце плазмы с  $\omega_p \gg \omega$ . В области больших магнитных полей сигнал дисперсии оказывается осциллирующим. Осцилляции в сигнале дисперсии возникали при  $I \gtrsim I_{\text{пор}}$  и сохраняли свое положение при возрастании накачки от пороговой до максимальной (при этом, однако, соотношение осциллирующей и монотонной компонент сигнала дисперсии изменялось, и при максимальной накачке вклад монотонной компоненты был больше, чем осциллирующей). Положение осцилляций изменялось при изменении ориентации образца относительно магнитного поля. Как было показано в [2], в области сильных магнитных полей в плотной ЭДП, в принципе, могут наблюдаться размерные и магнито-плазменные резонансы, проявляющиеся в поглощении СВЧ волны. Однако, в сигнале дисперсии эти резонансы практически не должны проявиться.

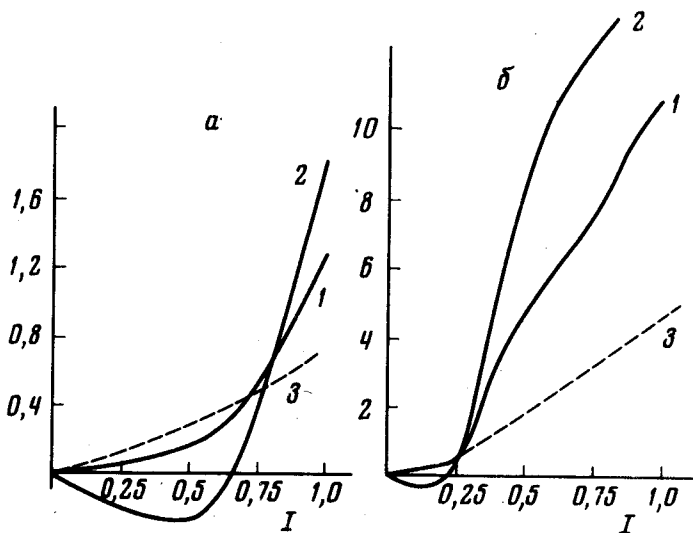


Рис. 1. Сигналы поглощения и дисперсии в нулевом магнитном поле. Образец толщиной 35 мкм.а —  $T = 4,2\text{K}$ , б —  $T = 1,8\text{K}$ : 1 — поглощение, 2 — дисперсия, 3 — поглощение в сильном СВЧ поле, при мощности СВЧ  $\sim 10\text{ мвт}$

По нашему мнению, наблюдавшиеся осцилляции сигнала дисперсии могут быть интерпретированы как проявление эффекта Шубникова — де Гааза. Аналогичное поведение сигнала дисперсии было обнаружено в работе [4] при исследовании InSb с  $n \approx 10^{16}\text{ см}^{-3}$ , и было показано, что оно возникает при малых значениях  $\omega\tau_p$  и обусловлено осцилляциями Шубникова — де Гааза в проводимости образца. Так как положение наблюдавшихся нами осцилляций не изменялось с накачкой, то можно сделать вывод, что уровень Ферми в этой плазме оставался неизменным. Его величина была оценена  $\epsilon_F \approx 0,9\text{ мэв}$ , что соответствует плотности  $n \approx 5 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$ .

Таким образом, исследования поглощения и дисперсии показывают, что при  $I > I_{\text{пор}}$  плотность электронно-дырочной плазмы не растет монотонно; в области возбуждения, по-видимому, происходит расслоение плазмы на плотную и разреженную фазы.

Исследование зависимости интенсивности рекомбинационного излучения от мощности возбуждения показало, что в тонких образцах ( $\leq 50$  мкм) одновременно с появлением пороговых явлений на СВЧ возникает линия излучения "обычного" конденсата экситонов (0,709 эв).

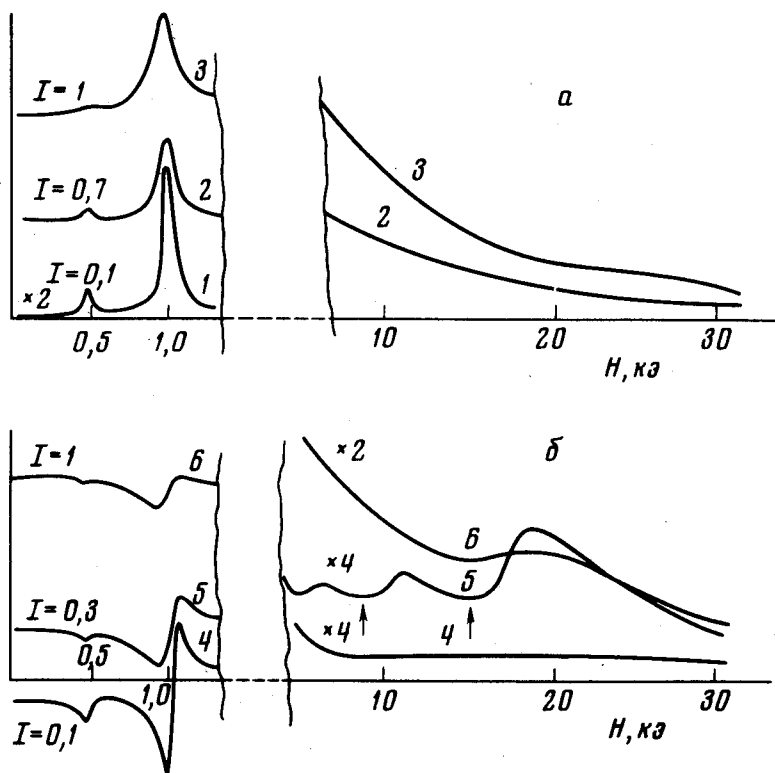


Рис. 2. Спектры поглощения (а) и дисперсии (б) в магнитном поле. Образец толщиной 325 мкм. ( $T = 1,8$ К. Интенсивность возбуждения ( $I$ ) указана в единицах  $I_{max} = 10$  вт/см<sup>2</sup>. Направление магнитного поля совпадает с осью  $\langle 111 \rangle$

При изменении температуры точка порога слабо смещалась, следуя за порогом в СВЧ явлениях. В массивных образцах (толщиной  $> 200$  мкм) порог излучения совпадал с порогом в СВЧ явлениях при  $T > 3$ К, а при  $T < 3$ К порог излучения резко смещался в область малых накачек, аналогично [5], в то время как в СВЧ явлениях существенных изменений не происходило. Таким образом, условия появления отмеченных выше областей плазмы (а именно: значительная пороговая накачка, слабая зависимость порога явления от температуры), а также свойства этой плазмы (ее плотность и  $r_p$ ) существенно отличаются от свойств и пороговых условий появления конденсированной фазы экситонов [5, 6]. В работах [1, 2] при импульсном возбуждении образцов германия были получены результаты, подобные изложенным выше: при довольно значительной накачке ( $\bar{n} > 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) после окончания импульса возбуждаю-

щего света порогом появлялось поглощение излучения СВЧ, имеющее вид нерегулярных флуктуирующих всплесков, что свидетельствовало о том, что поглощение обусловлено появлением областей плотной плазмы. Однако оказалось, что эти сгустки плазмы существуют в образце в течение времени, не превышающего  $< 10$  *мксек*, в то время как рекомбинационное излучение затухало с постоянной времени  $> 30$  *мксек*.

По нашему мнению, изложенные результаты можно объяснить, если предположить, что в слое образца вблизи его поверхности имеет место фазовый переход в неравновесной ЭДП, т. е. происходит расслоение плазмы на "плазменный пар" и "плазменную жидкость". Состояние "плазменной жидкости", как следует из импульсных измерений, по-видимому, является метастабильным, и она быстро релаксирует в "обычные" капли экситонного конденсата. При поверхностном возбуждении образец на поверхности генерируются электроны и дырки, которые диффундируют вглубь образца, связываясь в экситоны. При этом в слое толщиной  $\sim 30$  *мкм* вблизи поверхности концентрация несвязавшихся свободных носителей оказывается весьма значительной, и эта величина концентрации слабо зависит от температуры образца. Оценки показывают, что при  $I \approx 5 \cdot 10^{19}$  *см<sup>-2</sup>·сек<sup>-1</sup>*, плотность ЭДП вблизи поверхности (на расстоянии 30 *мкм*) может достигать  $10^{14}$  *см<sup>-3</sup>*. При  $T < 10$  К такая плазма является неидеальной, и в ней можно ожидать плазменного фазового перехода [7].

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
5 августа 1975 г.

### Литература

- [1] Б.М.Ашкинадзе, В.В.Рождественский. Письма в ЖЭТФ, 15, 371, 1972.
- [2] Б.М.Ашкинадзе, П.Д.Алтухов. ФТТ, 17, 1004, 1975.
- [3] H.Kawamura, H.Saji, M.Fukai. J.Phys. Soc. Japan, 19, 288, 1964.
- [4] J.K.Furdyna, A.R.Krauss. Phys. Rev., B2, 3183, 1970.
- [5] Я.Е.Покровский. Phys. Stat. Solidi, 31, 385, 1972.
- [6] T.K.Lo, B.J.Feldman, C.D.Jeffries. Phys. Rev. Lett., 31, 224, 1973.
- [7] З.А.Инсепов, Г.Э.Норман. ЖЭТФ, 62, 2290, 1972.