

## ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАСПАД ЗАРОДЫШЕЙ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ЭКСИТОНОВ В ГЕРМАНИИ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Б.М. Ашкинадзе, И.М. Фишман

При конденсации экситонов в Ge обычно реализуются капли, успешные дорасти до размера порядка нескольких микрон. Такие капли находятся в устойчивом равновесии с экситонами (на восходящей ветви  $n(r)$ ) [1].

Мы изучали процесс конденсации экситонов в условиях, когда образующаяся зародышевая капля немедленно удалялась из той области кристалла, где концентрация экситонов была достаточна для обеспечения ее дальнейшего роста — т. е. в условиях, когда все капли находились в неустойчивом равновесии с экситонным газом — на нисходящей ветви  $n(r)$ . При этом оказалось, что в такой системе маленьких-зародышевых капелек обнаруживается ряд эффектов, аналогичных явлениям при высоком уровне возбуждения в кристаллах германия [2].

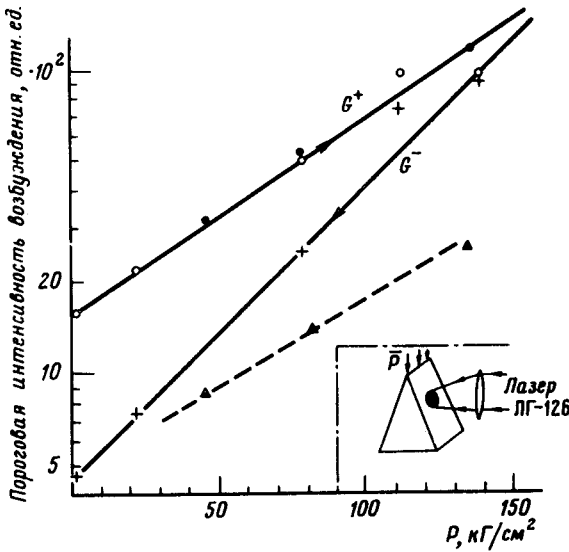


Рис. 1. Изменение порогов восходящей  $G_+$  и нисходящей  $G_-$  ветвей зависимости излучения  $709\text{ мэВ}$  от накачки при увеличении давления  $P$ ;  $T = 1.8\text{ К}$ :  $\circ, +$  — неоднородное давление,  $\bullet, \blacktriangle$  — однородное давление. На вставке схема опыта

Для быстрого удаления капель из области, где они возникали и могли расти, к образцу прикладывалась слабая неоднородная деформация (рис. 1). Известно, что при одноосной однородной деформации энергия на пару частиц в капле слегка растет (в области малых давлений), а энергия экситонов падает с ростом деформации [3]. Следовательно, в случае неоднородной деформации на капли и экситоны в области давлений до  $P_{кр}$  [3] будут действовать силы, направленные в противоположные стороны; при этом капли будут уходить из области возбужде-

ния в область малой деформации, а экситоны, напротив, в область большой деформации. Поскольку подвижность капель существенно выше, чем у экситонов, следует ожидать, что пространственное разделение ЭДК и экситонов будет обусловлено, в основном, движением капель. <sup>1</sup>

В этих условиях удается создать значительное число маленьких капелек, находящихся на неустойчивой ветви  $n(r)$ , и изучить поведение такой системы.

Тот факт, что все капли находились на неустойчивой ветви  $n(r)$  был получен из исследования явления гистерезиса [4], приводящего к неоднозначной зависимости интенсивности излучения капель (линия 709 мэв) от уровня возбуждения. Когда накачка увеличивается, первые капли выпадают при достижении значительного пересыщения экситонного  $n^*/n_{T\infty} = \exp(2\sigma/n_0 R^*kT)$ ; при этом, если возбуждение нарастало медленно, возникший зародыш, радиуса  $R^*$ , успевает дорасти до максимально возможного при данной температуре радиуса  $R_{max}$ , опре-

деляемого из условия  $n^* = n_{T\infty} \exp \frac{2\sigma}{n_0 kTR_{max}} + \frac{R_{max}}{3v\tau_0} n_0$  [1]. При

дальнейшем увеличении накачки в системе будет расти число капель радиуса  $R_{max}$ . Если теперь уменьшать уровень возбуждения, то начинает падать концентрация экситонов и, следовательно радиус капель —  $R$ . При  $n^{**} \geq n_{T\infty}$  капли достигают минимального радиуса  $R_{min}$ , отвечающего устойчивому состоянию системы, и эта точка определяет порог нисходящей ветви гистерезиса.

В нашем эксперименте образец Ge возбуждался светом лазера (1,15 мкм); прерыватель на частоте 120 иц был установлен после образца перед входной щелью монохроматора. Для каждой величины приложенного давления снимался гистерезис рекомбинационного излучения жидкой фазы, и изучался сдвиг порогов восходящей ( $G_+$ ) и нисходящей —  $G_-$  ветвей гистерезиса под давлением (рис. 1). <sup>1</sup>

1. Видно, что оба порога растут под давлением, однако порог исчезновения излучения —  $G_-$  сдвигается быстрее, чем  $G_+$ , так что при давлении  $\sim 140$  кг/см<sup>2</sup> гистерезис исчезает. Для образца той же ориентации, но в форме прямоугольного параллелепипеда — при однородной деформации — пороги  $G_+$  и  $G_-$  как видно из рисунка, также изменяются с давлением, однако величина  $G_+/G_-$  остается практически постоянной.

Возрастание порога  $G_+$  обусловлено уменьшением энергии связи частиц в капле под давлением. Исчезновение гистерезиса при  $P = 150$  кг/см<sup>2</sup> в неоднородно сжатом образце означает, что ни одна из капель не достигает радиуса, превышающего  $R_{min}$ , где бы они могли долго существовать и приводить к гистерезису, т. е. все капли имеют размер  $R^* < R < R_{min}$ .

2. Оценка размеров капель была получена из анализа спектров излучения ЭДК (рис. 2). Видно, что при неоднородном давлении  $\sim 150$  кг/см<sup>2</sup> спектр сдвигается на  $\sim 6,3$  мэв в коротковолновую сторону, причем линия излучения слегка сужается. При больших давлениях ( $P > 250$  кг/см<sup>2</sup>) линия, как обычно, сдвигается в длинноволновую сторону. При однородном давлении, как видно из рис. 2, сдвиг спектра практически отсутствует. Коротковолновый сдвиг спектра, по-видимому, можно объяснить уменьшением энергии связи на пару частиц в капле малого радиуса

[5]:  $\phi = \phi_0 - 2\sigma/n_0 R$ , и оценить средний радиус капли  $R = 2\sigma/n_0 \Delta\phi \sim 4 \cdot 10^{-6}$  см, что оказывается близким к размеру критического зародыша [4].

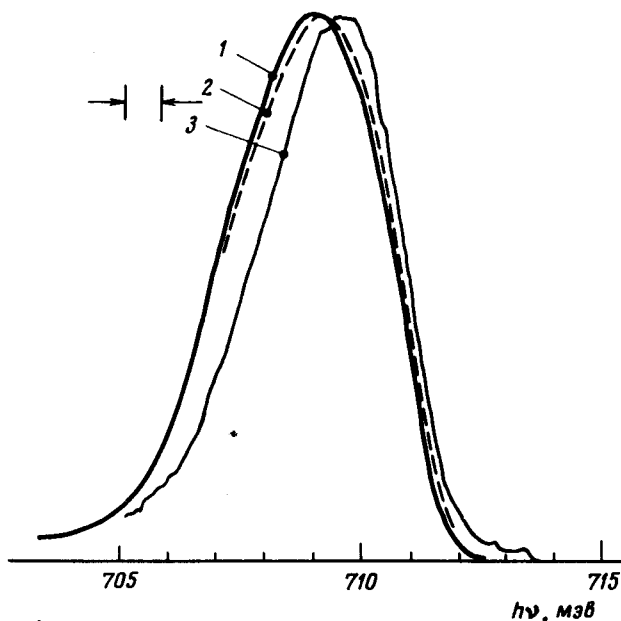


Рис.2. Спектры излучения капель в отсутствие давления - 1; 2 - при однородной деформации  $P = 150 \text{ кг/см}^2$ ; 3 - при неоднородной деформации  $P = 150 \text{ кг/см}^2$   $T = 1.8 \text{ К}$

3. При неоднородном давлении  $\sim 150 \text{ кг/см}^2$  интенсивность излучения ЭДК при накачке примерно на порядок превышает пороговую, падает в три - пять раз по сравнению с недеформированным образцом<sup>1)</sup>.

Падение интенсивности излучения, по-видимому, обусловлено уменьшением времени жизни маленьких капелек, вынесенных из области возбуждения. Действительно, если капля оказалась в "пустом" кристалле, то она будет гибнуть в результате процессов рекомбинации и испарения. При этом характерное время существования капли будет  $t_c$  - "cutt of time" [3], которое для капли радиуса  $\sim 10^{-4}$  см и 2К составляет  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  сек. Однако при  $R \lesssim 10^{-5}$  см роль испарения из капли возрастает из-за снижения энергии связи на пару частиц в капле, и время  $t_c$  резко падает до  $t_c < 2 \cdot 10^{-7}$  сек.

Такого катастрофического падения времени жизни и интенсивности излучения капель не наблюдается ввиду того, что как показано в работе [6], при достаточной плотности ЭДК, когда выполняется условие  $4\pi R^2 v_T N_k > 1/r_g$ , испаряющиеся экситоны будут быстро залипать на другие капли и замедлять процесс их гибели.

4. Изложенные выше соображения позволяют, по нашему мнению, объяснить ряд эффектов, возникающих при высоком уровне возбуждения, исследованных в работах [2]. Известно, что при достижении некоторо-

<sup>1)</sup> Этот факт отмечался в ряде работ (см., например, [3]).

го порогового значения накачки капли разлетаются [3] из области возбуждения и при этом происходит а) уменьшение времени жизни в системе капель [6] (либо насыщение сигнала излучения ЭДК при стационарном возбуждении [2]); б) в СВЧ проводимости обнаруживается пороговое появление в образце сгустков плотной плазмы [2].

Можно полагать, что когда начинается разлет капель, значительная их доля вылетает из области возбуждения, не успев дорасти до размера  $R_{min}$ . Эти маленькие капельки радиуса  $R < R_{min}$  будут быстро испаряться, а при достижении  $R \approx R^*$ , когда энергия связи частиц в капле будет близка к нулю, произойдет мгновенное испарение — "взрыв" зародыша, что приведет к появлению короткоживущего маленького сгустка плотной плазмы или "металлизированных" экситонов. Число таких "взрывов" резко растёт, когда начинается разлет и измельчение капель, что и приводит к пороговому появлению СВЧ поглощения.

Для проверки этого предположения образец помещался внутрь волновода 8-миллиметрового диапазона, и к нему прикладывалось неоднородное давление. Было обнаружено, что порог появления резко флуктуирующего СВЧ поглощения<sup>2)</sup> смещался к существенно меньшим уровням возбуждения, в то время, как порог явления конденсации (излучение линии 709 мэв) рос, как уже отмечалось выше, и при  $P \sim 200$  кГ/см<sup>2</sup> эти пороги оказывались практически одинаковыми. Таким образом, когда возникшие зародыши — (капельки) быстро выносились из области возбуждения, наблюдалось появление сгустков плотной плазмы.

Авторы благодарят С.М.Рывкина и А.В.Субашиева за плодотворное обсуждение.

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

Поступила в редакцию  
9 августа 1977 г.

### Литература

- [1] R.N.Silver. Phys. Rev., B11, 1569, 1975; В.С.Багаев, Н.В.Замковец, Л.В.Келдыш, Н.Н.Сибельдин, В.А.Цветков. ЖЭТФ, 70, 1501, 1976.
- [2] Б.М.Ашкинадзе, И.М.Фишман. Письма в ЖЭТФ, 22, 336, 1975; 24, 375, 1976.
- [3] I.C.Hensel, T.G.Phillips, G.A.Thomas. The Electron-Hole Liquid in Semicond. to be published.
- [4] R.M.Westervelt, I.L.Staehli, E.E.Haller, C.D.Jeffries in Proc. Oji Seminar on Physics of Highly Excited States, Japan, 1975.
- [5] В.Еtienne, С.Вenoit a la Guillaume, M.Voos. Phys. Rev. Lett., 35, 536, 1975.
- [6] Б.М.Ашкинадзе, И.М.Фишман. ФТП, 11, 408, 1977.

<sup>1)</sup> При стационарном возбуждении аномальное СВЧ поглощение регистрировалось как пороговое возрастание шума в СВЧ тракте.