

## ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЕЛЬ В ГЕРМАНИИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 0,5°K

Т. И. Галкина, В. А. Милев, Г. Н. Михайлова,  
Н. А. Пенн

Исследовалась излучательная рекомбинация электронно-дырочных капель (э-д капель) в чистом Ge при температуре 1,3 – 0,5°K с целью построения фазовой диаграммы электронно-дырочная жидкость – газ свободных экситонов при 0,5°K. Пороговая концентрация экситонов, при которой возникают э-д капли при 0,5°K, оценена в  $\leq 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Новых линий излучения (например, линии экситонной молекулы) не обнаружено. Уширение линии излучения э-д капель объясняется влиянием деформаций в области зародышей конденсации.

При температуре 1,5 – 4,2°K в фотолюминесценции чистого Ge возникает новая линия излучения с энергией  $E_{\text{макс}} = 708,5 \text{ мэв}$  [1], связанная с излучательной аннигиляцией электронно-дырочных капель (э-д капель) [2 – 4].

Вместе с тем известно, что в ряде широкозонных полупроводников CuBr, CuCl, Cu<sub>2</sub>O, CdSe в спектрах излучения при некоторых уровнях возбуждения наблюдается линия, обусловленная аннигиляцией экситонной молекулы<sup>1)</sup>. Расчеты энергии связи биэкситона с учетом анизотропии электронных масс дали для Ge величину  $\mathcal{E}_m \sim 0,1 \text{ мэв}$  в работе Бринкмана, Райса и Белла. Энергия связи э-д капель в Ge или "работа выхода" из металлического состояния в газ свободных экситонов по теоретическим оценкам и большому числу экспериментальных работ равна 1,5 ÷ 2,5 мэв [5 – 7]. Из энергетических соображений следует, что при температуре 1,5 – 4,2°K ( $kT \sim 0,12 \div 0,4 \text{ мэв}$ ) вероятность связывания в биэкситоны будет ничтожна по сравнению с вероятностью образования э-д капель.

Было интересным исследовать рекомбинационное излучение чистого Ge при более низких температурах, понизив уровень возбуждения, так как при температуре  $\sim 0,5^\circ\text{K}$  ( $kT \sim 0,04 \text{ мэв}$ ) можно ожидать появления новой линии излучения – излучения экситонной молекулы.

Исследовались образцы чистого Ge с концентрацией остаточной примеси  $N_A + N_D \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , изготовленные в виде сферы Вейерштрассе (диаметром 6 и 4 мм) для увеличения выхода рекомбинационного излучения из образца. Возбуждение осуществлялось гелий-неоновым лазером, работавшим на длине волны 1,15 мк. При записи спектров излучения падающая на образец световая мощность не превышала 3 мвт. Использовалась обычная схема регистрации спектров с при-

<sup>1)</sup> Авторы благодарны Бринкману, Райсу и Беллу за предоставление препринта работы.

менением синхронного детектирования. Спектры анализировались решеточным спектрометром ИКМ-1. Приемником служило охлаждаемое фото-сопротивление на основе PbS. Спектральная ширина щели составляла  $0,8 \div 1,5 \text{ мэв}$ . Образец Ge находился в стеклянном криостате во внутреннем дьюаре, заполненном  $\text{He}^3$  (рис. 1) [8]. Образец крепился с помощью клея Arizon M на медную пластинку, которая для уменьшения перегрева образца имела площадь контакта с  $\text{He}^3 \sim 25 \text{ см}^2$ . Прямые

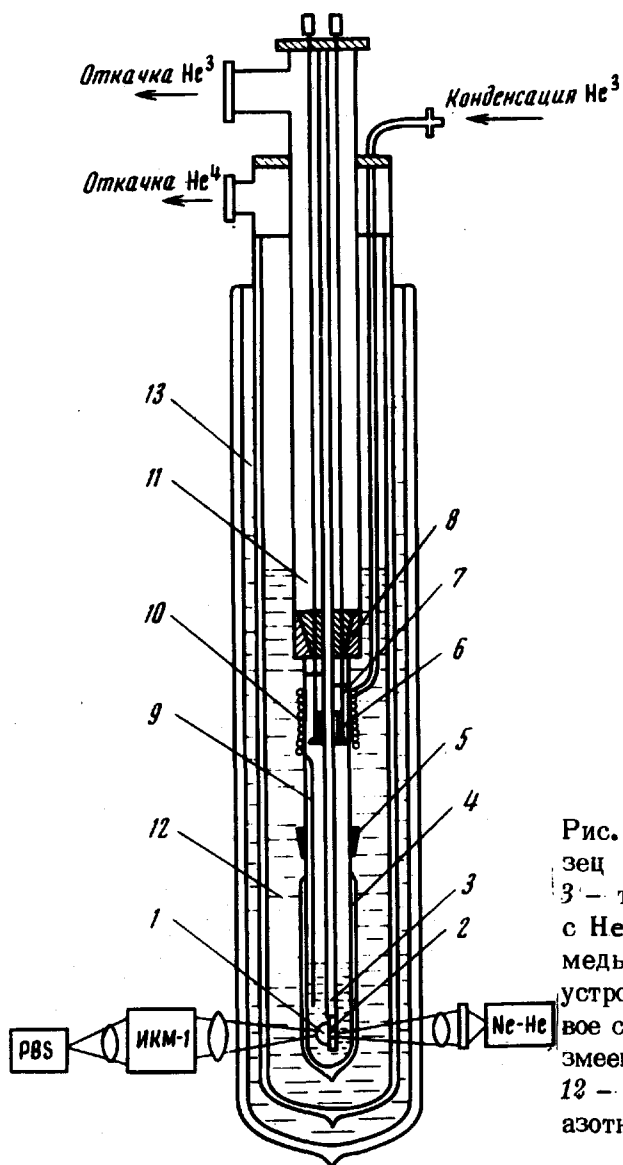


Рис. 1. Схема прибора: 1 – образец Ge, 2 – медная подложка, 3 – труба подвески, 4 – дьюар с  $\text{He}^3$ ,  $T = 0,5^\circ\text{K}$ , 5 – переход медь – стекло, 6 – юстировочное устройство, 7 – экран, 8 – шлифовое соединение, 9 – капилляр, 10 – змеевик, 11 – труба откачки  $\text{He}^3$ , 12 – ванна  $\text{He}^4$ ,  $T = 1,3^\circ\text{K}$ , 13 – азотный дьюар

измерения температуры образца с помощью чувствительного угольного термометра, приклеенного к образцу, показали, что перегрев при падающей мощности  $\sim 3 \text{ мвт}$  не превышает  $0,1^\circ$ , если температура ванны составляет  $\sim 0,5^\circ\text{K}$  (площадь образца –  $20 \div 28 \text{ мм}^2$ ). Интенсивность лазерного возбуждения изменялась калиброванными нейтральными фильтрами, и минимальная величина падающей на образец световой мощности,

при которой еще регистрировалось излучение э-д капель, составляла 150 мквт.

При понижении температуры от 1,3 до 0,5°K интенсивность излучения для наиболее чистого образца Ge ( $N_A + N_D \sim 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) возросла на 20 – 30%, в то время как интенсивность излучения более легированного образца практически не изменилась.

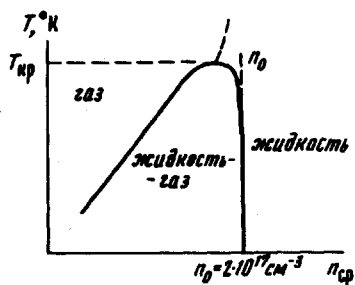


Рис. 2. Схематическая фазовая диаграмма э-д жидкость – газ свободных экситонов:  $T_{кр}$  – критическая температура,  $n_{ср}$  – средняя концентрация экситонов,  $n_0$  – равновесная концентрация носителей в э-д капле

Представляло интерес определить порог возникновения линии э-д капель при температуре 0,5°K, снижая мощность освещения. Иными словами, интересно было определить точку на фазовой диаграмме э-д жидкость – газ свободных экситонов при  $T = 0,5^\circ\text{K}$ . Было получено, что при температуре 0,5°K излучение э-д капель возникает при средней концентрации неравновесных носителей  $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (полагая  $L_{\text{экс}} \sim 0,5 \text{ мм}$ ;  $\tau_{\text{экс}} \sim 10^{-6} \text{ сек}$ ). Надо учитывать, что эта величина завышена, так как на вход фотоприемника попадает лишь излучение, собранное в телесном угле, определяемом апертурой фокусирующей линзы, т. е.  $\sim 1\%$  излучения, выходящего в полупространство. (Применение образцов в форме сферы Вейерштрассе увеличивает это значение на порядок).

Отметим, что во всем интервале используемых интенсивностей оптического возбуждения (150 мквт ÷ 3 мвт) других линий излучения, или расщепления линии излучения э-д капель обнаружено не было.

При понижении температуры максимум линии излучения э-д капель не смещается, однако, ширина линии несколько возрастает. Если при температуре 1,5 ÷ 4,2°K ширина линии  $\Delta\lambda$  составляет  $3,1 \pm 0,2 \text{ мэв}$ , то при 0,5°K  $\Delta\lambda = 3,5 \pm 0,2 \text{ мэв}$ .

Уширение линии не может быть связано с изменением равновесной концентрации  $n_0$  в капле. Действительно, правая ветвь фазовой диаграммы жидкость – газ при низких температурах практически вертикальна, т. е.  $n_0$  может заметно меняться только при температурах, близких к  $T_{кр}$  (рис. 2).

Мы предполагаем, что при низких температурах, когда размер капель сильно уменьшается (так, по данным<sup>1)</sup> радиус капель уменьшается в интервале температур 3,5 ÷ 2,5°K от 10 до 4 мк), натяжения в местах

<sup>1)</sup> Результаты взяты из работы В.С.Багаева, Н.А.Шенина, Н.Н.Сибольдина, В.А.Цветкова, которая вскоре будет опубликована в ФТТ.

конденсации капель могут привести к уширению линии со стороны длинноволнового края [2] в результате неоднородного сдвига максимума линии излучения различных э-д капель.

Авторы благодарны Л.В.Келдышу за ценные замечания,

Физический институт  
им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
14 июня 1973 г.

### Литература

- [1] Я.Е.Покровский, К.И.Свистунова. Письма в ЖЭТФ, 9, 435, 1969.
  - [2] В.С.Багаев, Т.И.Галкина, О.В.Гоголин, Л.В.Келдыш. Письма в ЖЭТФ, 10, 309, 1969.
  - [3] Я.Е.Покровский, К.И.Свистунова. Письма в ЖЭТФ, 13, 297, 1971.
  - [4] В.С.Багаев, Т.И.Галкина, Н.А.Пенин, В.Б.Стопачинский, М.Н.Чураева. Письма в ЖЭТФ, 16, 120, 1972.
  - [5] W. Brinkman, T. Rice, P. Anderson, S. Chui. Phys. Rev. Lett., 28, 961, 1972.
  - [6] M. Combescot, R. Nozieres. J. Phys. C., 5, 2369, 1972.
  - [7] О.В.Гоголин. Канд. диссертация, МГУ, 1971.
  - [8] А.Б.Фрадков, Г.Н.Михайлова, В.А.Миляев, С.И.Валянский. Краткие сообщения по физике, ФИАН №7, 1973.
-