

Письма в ЖЭТФ, том 10 стр. 309 – 313

5 октября 1969 г.

ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЕЛЬ В ГЕРМАНИИ

Б.С.Багаев, Т.И.Галкина, О.В.Гоголин, Л.В.Келдыш

В [1] было указано на возможность образования конденсированной фазы электронов и дырок в полупроводниках в условиях повышенной концентрации экситонов и низких температурах. В [2] и [3] сообщалось об экспериментальном наблюдении конденсата в германии в исследований по поглощению и излучательной рекомбинации.

Одной из наиболее характерных особенностей такого конденсированного состояния – электронно-дырочных капель (ЭД капель) – должна быть их крайне высокая подвижность. Действительно, рассеяние на фононах электронов и дырок, входящих в состав капли, подавлено по сравнению с рассеянием свободных носителей при той же температуре за счет имеющегося в капле фермиевского вырождения и убывает с уменьшением температуры как T^5 [4]. Оценки для германия в предположении, что равновесная концентрация в капле $n_0 \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [3, 4], дают времена свободного пробега относительно столкновений с фононами $\tau \sim 10^{-6} - 10^{-7} \text{ с}$ при 2–4°К. Кроме процессов излучения и поглощения фононов отдельными носителями, капля как система, связанная внутренними силами, может излучать и поглощать как целое, изменяя скорость своего поступательного движения. Однако, такие процессы становятся возможными лишь тогда, когда скорость капли превышает скорость звука. Кажется правдоподобным,

что капли должны легко ускоряться до скорости звука, а дальнейший рост их скорости будет ограничен указанным механизмом. Поэтому приобретает интерес вопрос о том, какие воздействия могут эффективно ускорять капли. Эту роль могут играть неоднородные электрические и магнитные поля и неоднородные деформации. Наиболее эффективным представляется последний механизм, и его мы рассмотрим подробнее.

Пусть в кристалле создано поле натяжений σ_{ik} (r) и пусть энергия на одну частицу в капле E_k (как и вообще вся энергия в кристалле) зависит от σ . Тогда на каплю, находящуюся в точке r действует сила

$$F_i = - (N \operatorname{grad} E_k(\sigma))_i = - N \frac{\partial E_k}{\partial \sigma_{ik}} \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial r_i}$$

(N – число частиц в капле)
и за время свободного пробега t , капля наберет скорость $\frac{\partial E}{\partial \sigma_{ik}} \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial r} \frac{r}{m}$,

где m – масса экситона. Принимая $\partial E / \partial \sigma \approx 10^{-5}$ эв/см⁻², $\tilde{T} \sim 10^{-6}$ сек и $m \sim 10^{-27}$ г, получим, что капля ускоряется до скорости звука при пространственном изменении напряжения на 10 кг/см² на длине в 1 см.

Нами были проделаны эксперименты по изучению рекомбинационного излучения в условиях одностороннего сжатия. Исследования проводились на монокристаллах германия n -типа с концентрацией остаточной примеси $5 \cdot 10^{11}$ см⁻³. Источником возбуждения служил Не – Не ОКГ с длиной волны излучения 1,15 мк. Источник позволял получать световые потоки около 10^{17} фот/сек. Диаметр пятна ~ 300 мк. Измерения проводились при температурах 2 и 4°К. В спектре фотолюминесценции наряду с излучением свободного экситона ($E_{max} = 713,8$ мэв) наблюдалась линия излучения ЭД капель с $E_{max} = 709,6$ мэв [3].

Основные результаты измерений, показанные на рис. 1 и 2, сводятся к следующему. 1. В интервале давлений 0–350 кг/см² линия излучения ЭД капель практически не смещается с давлением, в отличие от экситонной линии. 2. В области $P > 350$ кг/см² E_k смещается в длинноволновую область быстрее E_D и E_{ex} , которые попрежнему сдвигаются почти параллельно друг другу и с тем же наклоном, что и до 350 кг/см².

3. Интенсивность излучения капель во всем изучавшемся интервале давлений катастрофически падает (падение в 10–150 раз для различных образцов и геометрии эксперимента), интенсивность же экситонной линии сначала несколько возрастает, а затем убывает, но значительно медленнее, чем излучение капель.

Результат 1 объясняется уменьшением энергии связи частиц в капле, связанным с изменением структуры зоны проводимости германия при одноосной деформации вдоль оси [111]. При такой деформации из четырех эквивалентных минимумов зоны проводимости один понижается и в него перетекают электроны из других минимумов. При этом растет энергия Ферми и давление электронов, что должно привести к расширению капли, т. е. к уменьшению равновесной плотности частиц и падению энергии связи на пару частиц, поскольку увеличивается среднее расстояние между частицами. Иными словами, с ростом деформации должно происходить сближение капельной и экситонной линий, что и наблюдается. Это сближение должно, очевидно, прекратиться, когда все электроны перетекут в один минимум, т. е. когда минимумы разойдутся на величину, большую энергии Ферми, что также качественно соответствует рис. 1.

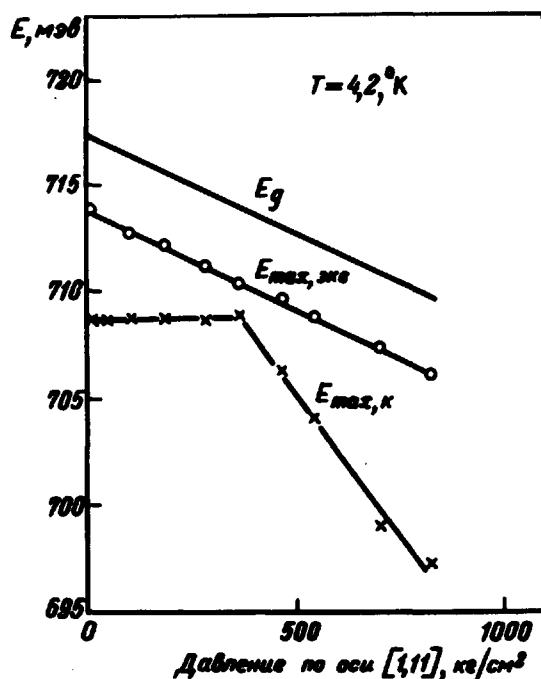


Рис. 1. Зависимость ширины запрещенной зоны (E_g), энергии экситонного излучения и энергии излучения электронно-дырочных капель от одноосного сжатия.

Давление $300 \text{ кг}/\text{см}^2$ соответствует $\Delta E_d \sim 3 \text{ мэв}$, что по порядку величины близко к энергии Ферми в капле, оцениваемой по ширине линии излучения и равновесной концентрации n_0 .

При больших давлениях линия ЭД капель должна сдвигаться параллельно $E_{\text{ экс.}}$ и E_k . Это на первый взгляд противоречит результату 2. Результаты 2 и 3 легко могут быть объяснены, однако, движением капель, вызванным макроскопической неоднородностью деформации, неизбежной в условиях описанного эксперимента [5]. При наличии такой неоднород-

ности ЭД капли втягиваются в область максимальной деформации и их излучение выходит из области, где деформация заведомо больше средней. Поэтому E_k смещается быстрее, чем экситонная линия, сдвиг которой обусловлен средним натяжением в освещаемой области образца. Эта точка зрения подтверждается еще и тем, что наклон $E_k(P)$ при $P > 350 \text{ кг/см}^2$ существенно меняется от образца к образцу и в зависимости от положения освещенного пятна на образце – от почти параллельного $E_{\text{экс}}$ до в 1,5 – 2 раза большего. Аналогично может быть объяснено и аномальное падение интенсивности излучения ЭД капель с увеличением деформации.

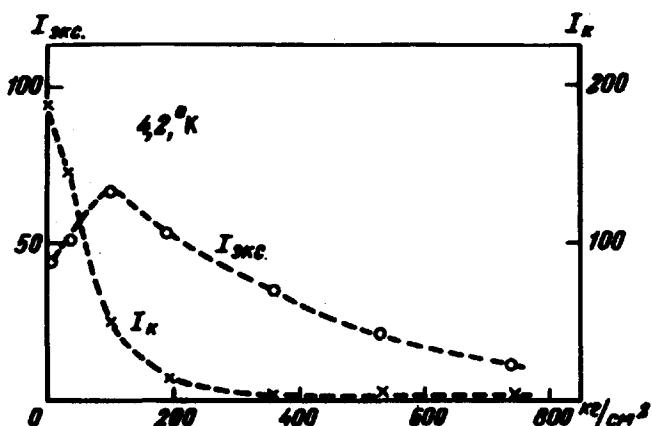


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения свободного экситона и электронно-дырочных капель от сжатия. По оси ординат: слева-масштаб для интенсивности экситонной линии, справа – для интенсивности излучения ЭД капель в относительных единицах.

Ускоряясь под действием градиента деформаций, капли уходят из области, где они могут расти (где созданы экситоны) за время $< L_D / S \sim 10^{-6} \text{ сек}$ (L_D – длина диффузии экситонов, S – скорость звука). Это время меньше времени жизни капли [3, 4], и она не успевает достигнуть своего равновесного объема. Иными словами, число экситонов, сконденсировавшихся в капле, убывает, поскольку из области, "насыщенной" экситонами, непрерывно вытягиваются зародыши ЭД капель по мере их образования. Картина усложняется еще и тем, что зародыши образуются, вернее всего на микронеоднородностях (имеются прямые экспериментальные доказательства, что эту роль играют дислокации), с которых их срывает приложенное натяжение. Следует отметить, что изложенное объяснение падения интенсивности ЭД капель нельзя использовать для области давле-

ний $< 300 \text{ кг}/\text{см}^2$, если считать, что в этой области E_K строго не зависит от давления. Однако, необходимые для ускорения капель сдвиги E_K столь малы, что вполне укладываются в пределы точности измерений ($\pm 0,5 \text{ мэв}$).

В пользу гипотезы о движении капель говорит и эксперимент, в котором регистрировалось излучение из малой области образца, в которой была создана сильная деформация с помощью вольфрамовой иглы. При перемещении области возбуждения по образцу на расстоянии до 5 мм от острия, интенсивность излучения из-под иглы падала не более чем в 2 раза, т. е. длина диффузии излучающих объектов была $\sim 1 \text{ см}$, что на порядок превышает длину диффузии свободных экситонов [6]. Подробное описание и обсуждение этих экспериментов будет опубликовано.

Физический институт

им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
12 августа 1969 г.

Литература

- [1] Л.В.Келдыш. Труды 9 Междунар. Конф. по физике полупроводников, М., 1969.
 - [2] В.М.Аснин, А.Л.Рогачев. Письма в ЖЭТФ, 9, 415, 1969 .
 - [3] Я.Е.Покровский, К.И.Свишунова. Письма в ЖЭТФ, 9, 435, 1969 .
 - [4] Ч.Киттель. Введение в физику твердого тела. Физматгиз, М., 1962 .
 - [5] L.Cuevas, H.Fritzsche. Phys. Rev., 137, 1847, 1965.
 - [6] Б.В.Новиков, Е.Ф.Гросс, М.А.Дрыгин. Письма в ЖЭТФ, 8, 15, 1968.
-