

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОВЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЕЛЬ В ГЕРМАНИИ

*В.М. Аснин, Б.М. Ашкинадзе, Н.И. Саблина,  
В.И. Степанов*

При действии потока фононов, генерированных тепловым контактом, на систему ЭДК в германии наблюдалось быстрое гашение рекомбинационного излучения капель, сопровождающееся появлением в образце плотной плазмы. Показано, что эти эффекты обусловлены выносом капель на поверхность образца и их гибелью там.

В работах [1, 2] было показано, что электронно-дырочные капли (ЭДК) в германии могут увлекаться потоком неравновесных фононов. Возникающее при этом движение капель приводит к ряду особенностей в поведении системы ЭДК [3, 4]. В настоящей работе обнаружено новое явление — гашение рекомбинационного излучения ЭДК потоком фононов, сопровождающееся появлением в кристалле плотной плазмы свободных носителей.

Поток неравновесных фононов, увлекающий капли, создавался с помощью тепловых импульсов [5, 6]. Как известно, сила увлечения определяется поглощением в каплях длинноволновых фононов с  $q \approx k_F$  и пропорциональна интенсивности потока фононов [1, 2, 6, 7], причем такие фононы распространяются в кристалле баллистически. Ввиду этого, генерация фононов с помощью тепловых импульсов является удобным методом изучения как самого процесса движения капель, так и сопровождающих его явлений, так как при этом можно легко регулировать величину силы, приложенной к каплям, и время воздействия.

Схема опыта показана на вставке к рис. 1. Исследовались образцы германия ( $N_i \approx 3 \cdot 10^{10} + 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) размером  $2 \times 4 \cdot (4 + 6) \text{ мм}^3$ , на одну из граней которых наносился тепловой контакт. Возбуждение капель осуществлялось с противоположной грани кристалла импульсом света GaAs-лазера, длительностью 1 + 2 мксек. Перед нанесением теплового контакта образец полировался и травился, затем методом катодного распыления наносилась изолирующая пленка  $\text{TiO}_2$ . Тепловой контакт получался напылением константановой пленки размером  $2 \times 3 \text{ мм}^2$ , которая имела сопротивление  $\approx 50 \text{ Ом}$ . На пленку подавались прямоугольные импульсы напряжения амплитудой до 20 В с регулируемой временной задержкой относительно импульса возбуждения. Изучалась релаксация рекомбинационного излучения ЭДК и СВЧ проводимости образца [4]. Регистрация излучения капель осуществлялась германиевым фотодиодом, постоянная времени фотоприемника составляла  $2 \cdot 10^{-7} \text{ сек}$ . Образец находился в жидком гелии при  $T = 1,8 \text{ К}$ .

Из рис. 1 видно, что воздействие потока фононов, создаваемых тепловым импульсом длительностью 5 мксек, на систему ЭДК приводит к появлению быстрой кинетики спада в излучении капель. Эффект возникает порогом при достижении мощности теплового импульса величины  $P_{\text{пор}} =$

$= 4 \text{ Вт/см}^2$ . Это демонстрируется на рис. 2, где показана зависимость сигнала излучения ЭДК после действия теплового импульса от его мощности.

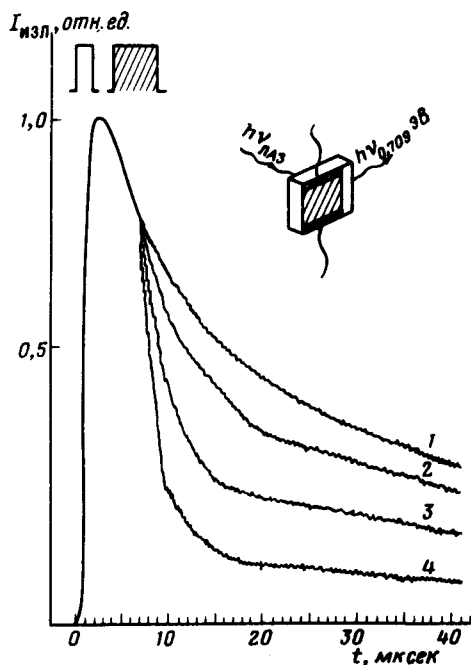


Рис. 1. Кинетика излучения ЭДК в германии при действии тепловых импульсов длительностью 5 мксек и различной мощностью  $P$ , Вт/см<sup>2</sup>: 1 – 0; 2 – 0,76; 3 – 3,9; 4 – 8,05. В верхней части рисунка показаны осциллограммы импульсов возбуждения и теплового

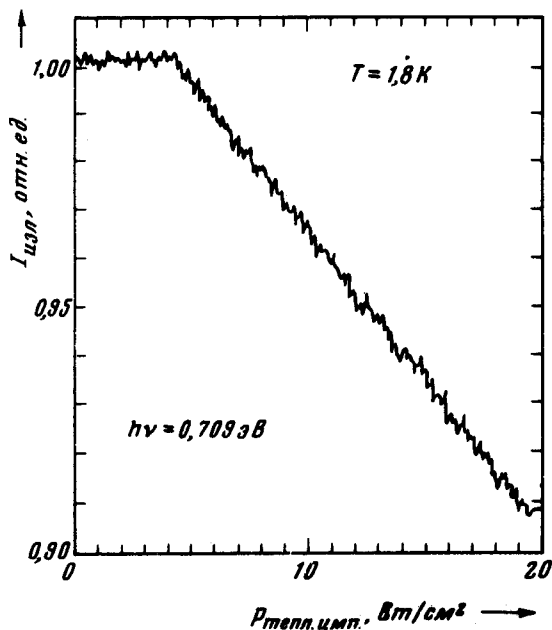


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения ЭДК после окончания теплового импульса от его мощности. Тепловые импульсы длительностью 5 мксек подавались с задержкой относительно импульса возбуждения, равной 7 мксек; а регистрация излучения спустя 29 мксек.

В работе [8], где непосредственно исследовалось увлечение ЭДК в германии фононами, генерируемыми тепловыми импульсами, получено, что именно такое значение  $p_{\text{пор}}$  соответствует началу движения капель. Существование порога для движения ЭДК было обнаружено

в работах [9, 10] и связано с удержанием капель на дефектах кристалла [8, 10, 11]. Для срыва капль с центров захвата необходимо приложить силу на пару частиц в капле, превышающую величину  $\approx 1$  мэВ/см [8, 10]. Таким образом гашение излучения возникает, когда капли приходят в движение под действием потока фононов<sup>1)</sup>. Причиной этого эффекта, по-видимому, является вынос капель на поверхность образца.

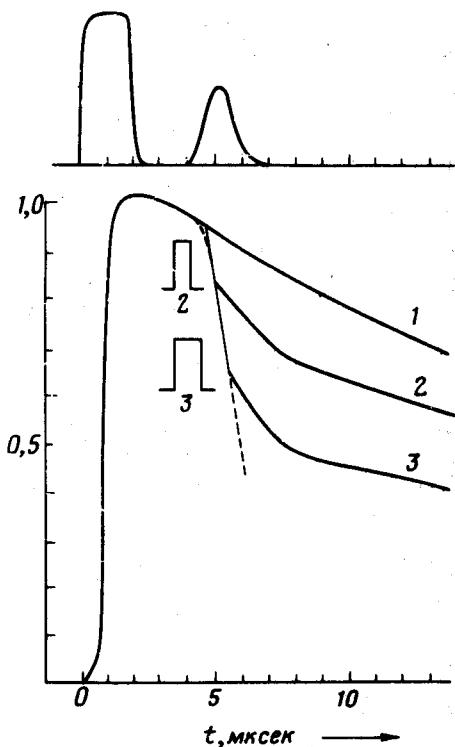


Рис. 3. Кинетика излучения ЭДК в отсутствии — 1 и при действии тепловых импульсов мощностью  $80 \text{ Вт/см}^2$  и длительностью  $t_u$ : 2 — 0,6 мксек, 3 — 1 мксек. Пунктиром показана кинетика спада, рассчитанная по формуле (1). В верхней части рисунка показаны осциллограмма СВЧ проводимости для  $t_u = 1$  мксек. Первый импульс СВЧ проводимости соответствует световому возбуждению

На рис. 3 показана осциллограмма сигнала излучения ЭДК при действии коротких тепловых импульсов, когда отчетливо видны три участка в кинетике излучения. Первый наиболее быстрый участок возникает с временной задержкой  $\approx 1$  мксек относительно начала теплового импульса. Время баллистического пролета фононов от металлической пленки до возбужденной области кристалла не превышает  $0,4 \cdot 10^{-6}$  сек. Следовательно, остальная часть времени задержки определяется временем выноса капель на поверхность и рекомбинации на ней.

Предположим, что исходное распределение капель в образце однородно со средней плотностью  $N_0$ . Полагая, что время жизни  $\tau_0$  электронно-дырочных пар в капле, находящейся в объеме образца толщиной  $d$ , много больше времени жизни капли, оказавшейся на поверхности  $\tau_n$ , можно легко получить следующее приближенное выражение для начальной релаксации излучения ЭДК в течение действия теплового им-

<sup>1)</sup> Резкий спад в кинетике излучения капель наблюдался в работе [12] при подаче мощного импульса СВЧ излучения, вызывавшего разогрев электронов и вследствие этого интенсивные потоки фононов.

пульса, который вызывает их движение к поверхности со скоростью  $v$

$$I \approx I_0 e^{-t/\tau_0} \left( 1 - \frac{vt}{d} + \frac{vt}{d} e^{-t/\tau_n} \right). \quad (1)$$

Как видно из этого выражения, при  $t < \tau_n$  и  $I \approx I_0$  спад излучения начнется с задержкой порядка  $\tau_n$ . При  $t > \tau_n$  кинетика спада излучения определяется величиной скорости капель. Зависимость (1) показана на рис. 3 пунктиром при  $\tau_n \approx 0,5 \cdot 10^{-6}$  сек и  $v = 6 \cdot 10^4$  см/сек. Полученное значение скорости согласуется с данными работы [8]. Величина  $\tau_n$  для капли, прижатой к поверхности, может быть оценена из выражения  $\tau_n \approx R/s$  (где  $R$  — радиус капли, а  $s$  — скорость поверхностной рекомбинации), откуда для  $R \approx 10^{-4}$  см,  $s \approx 200$  см/сек и  $d = 0,2$  см получим  $\tau_n \approx 0,5 \cdot 10^{-6}$  сек, в согласии с экспериментом.

Второй участок спада излучения, длящийся  $\approx 3$  мксек, по-видимому, отражает вклад поверхностной рекомбинации в релаксацию излучения капель, оказавшихся вблизи поверхности образца после окончания действия теплового импульса. Капли, оставшиеся в объеме, определяют третий участок спада с постоянной времени  $\tau_0 \approx 30$  мксек.

Одновременно с кинетикой излучения ЭДК исследовалась СВЧ проводимость образца по методике, описанной в работе [4]. Как видно из рис. 3 быстрое гашение излучательной рекомбинации капель сопровождается появлением в образце импульса СВЧ проводимости. При этом СВЧ проводимость также возникает порогом, который совпадает с порогом на рис. 2. Это означает, что СВЧ проводимость обусловлена выносом ЭДК на поверхность кристалла и возникновением вблизи нее плотной плазмы в результате распада капель.

Заметим, что пороговое появление быстрой кинетики спада излучения СВЧ проводимости также наблюдается при высоких уровнях возбуждения, когда капли начинают двигаться под действием собственного фононного ветра [4].

Авторы благодарят А.А.Рогачева за интерес к работе, И.М.Фишмана за полезные дискуссии и Т.В.Бурову за помощь в изготовлении тепловых контактов.

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

Поступила в редакцию  
9 августа 1979 г.

### Литература

- [1] В.С.Багаев, Л.В.Келдыш, Н.И.Сибельдин, В.А.Цветков. ЖЭТФ, 70, 702, 1976.
- [2] Л.В.Келдыш. Письма в ЖЭТФ, 23, 100, 1976.
- [3] J.C.Hensel, T.G.Phyllips, G.A.Thomas. Sol. Stat. Phys., 32, 87, 1977.
- [4] Б.М.Ашкинадзе, И.М.Фишман. Письма в ЖЭТФ, 24, 342, 1976.
- [5] Физика фононов больших энергий. Сб. под ред. И.Б.Левинсона. М., изд. Мир, 1976.

- [6] J.C.Hensel. R.C.Dynes. Phys. Rev. Lett., 39, 969, 1977.
- [7] В.М.Аснин, А.А.Рогачев, Н.И.Саблина, В.И.Степанов. ФТТ, 19, 3150, 1977; Письма в ЖЭТФ, 27, 584, 1978.
- [8] В.М.Аснин, Н.И.Саблина, В.И.Степанов. ФТТ, (в печати).
- [9] Б.М.Ашкинадзе, И.М.Фишман. ФТТ, 11, 301, 1977.
- [10] Б.М.Ашкинадзе, Т.В.Бурова, И.М.Фишман. Письма в ЖЭТФ, 29, 147, 1979.
- [11] R.M.Westervelt, J.C.Culberston, B.S.Black. Phys. Rev. Lett., 42, 267, 1979.
- [12] А.А.Маненков, С.П.Силин. Письма в ЖЭТФ, 25, 436, 1977.
-