

## ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЕЛЬ ОТ ИХ РАЗМЕРА В НЕОДНОРОДНО ДЕФОРМИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ

*А.Г.Макаров, А.А.Маненков, Г.Н.Михайлова,  
А.С.Сеферов*

Из сопоставления результатов измерения импульсной СВЧ проводимости и рекомбинационного излучения ЭДК в неоднородно деформированном Ge обнаружено увеличение средней концентрации носителей в ЭДК при возрастании размера капли.

В последнее время проявляется значительный интерес к исследованиям больших электронно-дырочных капель (ЭДК), образующихся при оптической накачке в условиях неоднородной деформации Ge [1]. Размер таких ЭДК может достигать 1 мм, время жизни  $\sim 500$  мксек, а плотность составляет  $\sim 2,5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  [2]. В работе [3] была предсказана неоднородность концентрации частиц внутри больших ЭДК. Исходя из предположения о параболической зависимости энергии деформации в потенциальной яме и из условия постоянства химпотенциала по всему объему капли, авторы [3] получили выражение для зависимости

концентрации носителей от радиуса капли ( $r$ ):

$$n(r) = n_0 [1 + \hat{\alpha} (R^2 - r^2)], \quad (1)$$

где  $\hat{\alpha} = \alpha/n_0^2 E_0''''$ ;  $E_0'''' = (d^2 E/dn^2)_{n=n_0}$ ;  $E_0$  и  $n_0$  – равновесная энергия на пару частиц и плотность ЭДК при данном давлении;  $\alpha$  (МэВ/мм<sup>2</sup>) – коэффициент, зависящий от давления;  $R$  – начальный радиус капли.

Из соотношения (1) следует, что концентрация частиц в центре капли больше, чем равновесная при данном давлении. В этой модели предполагается, что вся капля находится в потенциальном энергетическом минимуме и что дополнительное сжатие в центре капли происходит за счет градиента давления в потенциальной яме. В работе [4] распределение концентрации частиц внутри ЭДК от радиуса было исследовано экспериментально путем измерения пространственного профиля интенсивности люминесценции при непрерывной оптической накачке. Эти измерения подтвердили справедливость соотношения (1).

В условиях импульсного возбуждения носителей и наблюдения кинетики ЭДК такие исследования не проводились, между тем они представляют значительный интерес для выяснения адекватности описанной выше модели сжатия ЭДК в поле неоднородной деформации. В данной работе мы предприняли такие исследования, используя методику, основанную на одновременном измерении кинетики СВЧ проводимости и рекомбинационного излучения Ge после импульсного лазерного возбуждения. Основанием методики измерения средней концентрации частиц в ЭДК в этих экспериментах является следующее. В условиях существования больших ЭДК наблюдаемый с помощью СВЧ спектрометра сигнал ( $P_{\text{СВЧ}}$ ) обусловлен при  $T \approx 1\text{К}$  в основном расстройкой СВЧ резонатора ( $\Delta\omega$ ), в котором находится исследуемый образец, и эта расстройка пропорциональна объему ЭДК ( $v_{\text{ЭДК}}$ ):

$$\Delta\omega \sim \frac{v_{\text{ЭДК}}}{v_p} \omega_0^1).$$

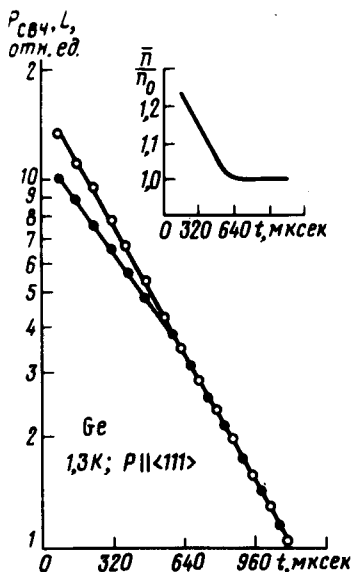
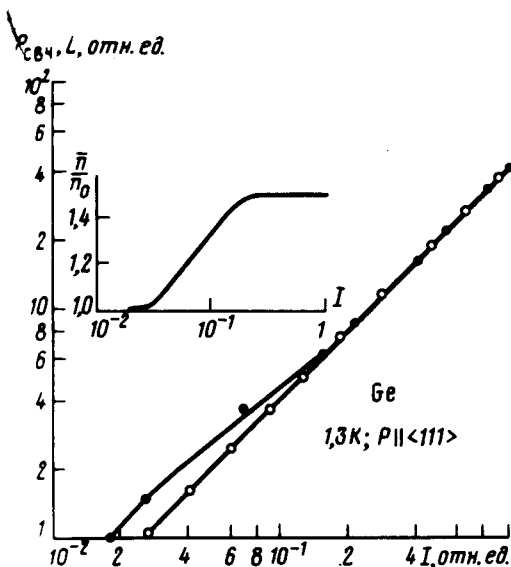
Интенсивность рекомбинационного излучения ЭДК ( $L$ ) пропорциональна полному числу частиц в ней. Поэтому, проводя в одном и том же эксперименте измерения кинетики сигналов СВЧ проводимости и люминесценции, можно определить плотность частиц в ЭДК  $\bar{n} = \beta L/P_{\text{СВЧ}}$  ( $\beta$  – коэффициент) и ее эволюцию во времени.

Эксперименты проводились при  $T = 1,3\text{К}$  на образцах бездислокационного Ge  $n$ -типа, с концентрацией остаточной примеси  $\sim 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , в форме диска  $\phi 4 \text{ мм}$ , толщиной 2 мм, неоднородно сжатого в направлении  $\langle 111 \rangle$ . Оптическое возбуждение осуществлялось импульсным YAG: Nd<sup>3+</sup>-лазером ( $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ ). Установка для одновременной регистрации СВЧ проводимости и люминесценции аналогична описанной в работе [5]. Конструкция для сжатия образца описана в работе [2].

<sup>1)</sup> Справедливость соотношения  $v_{\text{ЭДК}}/v_p \sim \Delta\omega/\omega_0$ , где  $v_p$  – объем резонатора,  $\omega_0$  – его собственная частота, проверялась путем прямого имитирования ЭДК металлической частицей [2].

Все приведенные ниже результаты относятся к величине приложенного давления  $P \approx 1500$  кГ/см<sup>2</sup>, определенной по сдвигу максимума линии излучения ЭДК в соответствии с данными [6]. Размер ЭДК варьировался уровнем лазерного возбуждения образца.

Регистрировались кинетика СВЧ проводимости и люминесценции, а также спектры излучения ЭДК при различных уровнях оптического возбуждения образца Ge.



На рис. 1 представлены зависимости амплитуды сигналов СВЧ проводимости и люминесценции ЭДК от интенсивности лазерной накачки. Видно, что в отличие от сигнала люминесценции, для которого амплитуда  $L$  пропорциональна интенсивности накачки  $I$ , сигнал СВЧ проводимости в области  $I < 0,15I_0$  нелинейно зависит от  $I$ . Естественно предположить, что это связано с изменением средней концентрации частиц

в ЭДК. Представленная на вставке рис. 1 зависимость  $\bar{n}/n_0(I) = \beta \frac{L(I)}{P_{\text{СВЧ}}(I)}$  свидетельствует об увеличении средней плотности ЭДК

в 1,5 раза при возрастании уровня возбуждения от  $\sim 8 \cdot 10^{11}$  до  $6 \cdot 10^{12}$  электронно-дырочных пар в образце.

Для исследования изменения средней плотности капли в процессе ее рекомбинации мы использовали измерение временных характеристик рекомбинационного излучения и СВЧ проводимости. На рис. 2 представлены кривые затухания люминесценции  $L(t)$  и СВЧ проводимости  $P_{\text{СВЧ}}(t)$  после лазерного импульса. При временах задержки  $t < 600$  мксек  $\tau_P > \tau_L$ , а затем постоянные времена обеих кривых становятся равными.

Считая, как и раньше, что  $\bar{n}/n_0(t) = \beta \frac{L(t)}{P_{\text{СВЧ}}(t)}$ , мы обнаружили

уменьшение на  $\sim 25\%$  средней концентрации частиц в капле по мере ее рекомбинации (вставка рис. 2).

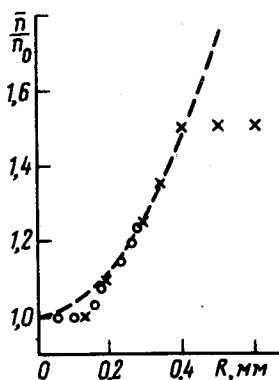


Рис. 3. Зависимости  $\bar{n}/n_0$  от радиуса ЭДК, полученные из данных рис. 1 (x), рис. 2 (o). Пунктиром показана зависимость  $\bar{n} = n_0 (1 + \frac{2}{5} \hat{a} R^2)$  при  $\hat{a} = 7 \text{ мм}^{-2}$  [3]

По-видимому, физическая причина изменения  $\bar{n}$  в ЭДК от интенсивности возбуждения и от времени одна и та же и связана с изменением размера капли. Это подтверждается данными рис. 3, где зависимости  $\bar{n}/n_0(I)$  и  $\bar{n}/n_0(t)$  перестроены как функции радиуса ЭДК, при этом, как отмечалось выше,  $R^3 \propto P_{\text{СВЧ}}$ . Видно, что обе зависимости хорошо совпадают.

Сравнение с теоретической кривой  $\bar{n}(R) = n_0 \left(1 + \frac{2}{5} \hat{a} R^2\right)$ , следующей из соотношения (1) при усреднении  $n(r)$  по объему капли, дает качественное согласие с экспериментом в области малых радиусов капли. При больших радиусах изменения плотности не наблюдается. Можно предположить, что в этих условиях квадратичное приближение для формы потенциальной ямы неприменимо.

В заключение авторы выражают благодарность Л.В.Келдышу за обсуждение результатов работы.

## Литература

- [1] J.P.Wolfe, R.S.Markiewicz, S.M.Kelso, J.E.Furneaux, C.D.Jeffries. *Phys. Rev.*, B18, 1479, 1978.
- [2] А.А.Маненков, В.А.Миляев, Г.Н.Михайлова, А.С.Сеферов. Письма в ЖЭТФ, 24, 141, 1976.
- [3] R.S.Markiewicz, S.M.Kelso. *Sol. St. Comm.*, 25, 275, 1978.
- [4] S.M.Kelso, R.S.Markiewicz, J.E.Furneaux. *Bull. Am. Phys. Soc.*, 22, 269, 1977.
- [5] Б.В.Зубов, А.А.Маненков, В.А.Миляев, Г.Н.Михайлова, Т.М.Мурина, А.М.Прохоров, А.С.Сеферов. ФТТ, 18, 2024, 1976.
- [6] C.Benoit á la Guillaume, M.Voos, F.Salvan. *Phys. Rev.*, B5, 3079, 1972.
-