

ОБНАРУЖЕНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ КАПЕЛЬ В ГЕРМАНИИ ПО СВЧ ПРОВОДИМОСТИ

*А.А.Маненков, В.А.Миллев, Г.Н.Михайлова,
А.С.Сеферов*

Исследована СВЧ проводимость в неоднородно деформированном Ge при импульсном лазерном возбуждении на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм и гелиевых температурах. Обнаружено существование больших ЭДК радиусом до 1 мкм с плотностью $\approx 2,5 \cdot 10^{16}$ см⁻³, энергией связи частиц $E_0 \approx 4,6$ мэв и временем жизни $\tau_0 \approx 500$ мксек.

В данной работе сообщается об обнаружении и определении параметров больших электронно-дырочных капель (ЭДК) в Ge в условиях неоднородного сжатия. Впервые большие ЭДК были обнаружены в [1, 2] по альфвеновскому размерному резонансу. В дальнейшем были предприняты исследования больших капель с помощью люминесценции [3, 4] и ИК зондирования [5]. Этим работам предшествовали детальные исследования влияния одноосного давления на спектр рекомбинационного излучения экситонов и ЭДК [6 – 10], в которых было обнаружено уменьшение энергии связи частиц в конденсированной фазе и движение ЭДК в условиях неоднородной деформации. Теоретически оценки параметров ЭДК при неоднородном сжатии получены в [11, 12].

В настоящей работе мы предприняли попытку экспериментально определить основные параметры ЭДК, используя методику СВЧ проводимости и СВЧ пробоя, примененную нами ранее при исследовании обычных мелких ЭДК [13]. Эксперименты проводились на образцах чистого (концентрация остаточной примеси $2,6 \cdot 10^{11}$ см⁻³) бездислокационного германия в форме диска диаметром 4 мм и толщиной 2 мм.

Для создания неоднородного сжатия образца применена конструкция, аналогичная описанной в [1, 2]. Значение приложенного давления было найдено по сдвигу максимума излучения ЭДК и составляло 950 кг/см² в соответствии с данными [8]. Изучалась СВЧ проводимость Ge на частоте 10 Гц при импульсном лазерном возбуждении на длине волны $1,06$ мкм (гигантские импульсы YAG · Nd³⁺-лазера длительностью ~ 200 нсек с энергией в импульсе 10^{-4} Дж) в диапазоне температур $4,2 - 1,3$ К.

На рис. 1, а приведен типичный сигнал кинетики СВЧ проводимости при $T = 4,2$ К в деформированном образце. Сигнал обязан свободным носителям, поскольку соответствует отрицательному изменению действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' образца. Естественно предположить, что такая форма сигнала СВЧ проводимости связана с существованием ЭДК большого размера, обладающей большим временем жизни, и отражает кинетику свободных носителей, испаряемых капель. Заметим, что в недеформированном Ge, как было ранее показано [13], соответствующие времена меньше на два порядка

величины. По-видимому существенным при этом является и наличие градиента давления, затрудняющего диффузию экситонов и носителей из области максимального давления.

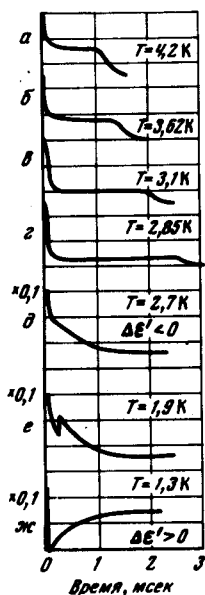


Рис. 1. Кинетика СВЧ проводимости деформированного Ge при разных температурах и фиксированном уровне возбуждения, соответствующем генерации в образце $\sim 10^{13}$ э-д пар. На рис. д, е, ж — начальный участок сигнала ограничен

Проведенные исследования кинетики СВЧ проводимости при разных температурах показали, что амплитуда участка сигнала, соответствующего квазистационарной концентрации носителей, резко уменьшается с понижением температуры (рис. 1, а — г, рис. 2), а при $T \approx 2,8\text{K}$ стремится к нулю. Этот факт легко объясняется в предположении, что амплитуда сигнала пропорциональна числу свободных носителей n_e , находящихся в равновесии с каплей, для которых

$$n_e \sim (kT)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_0}{2kT}\right)^{1)}, \quad (1)$$

где E_0 — энергия связи частиц в ЭДК.

Из сопоставления графика зависимости $\ln A / (T/T_0)^{3/2}$ от $(1/T)$ (рис. 2) с формулой (1) легко найти энергию связи частиц в большой ЭДК, которая оказалась равной $E_0 = 4,6 \pm 0,2 \text{ эВ}$.

Кроме того при понижении температуры от 4,2 до 2,85 K наблюдалось удлинение квазистационарного участка сигнала при фиксированном уровне возбуждения. Этот результат, очевидно, связан с увеличением времени жизни большой ЭДК за счет уменьшения испарения при более низких температурах. Однако в [2] отмечалось, что испарение из большой

1) В приведенной формуле не принимается во внимание изменение эффективного объема капли из-за наличия деформационной потенциальной ямы.

капли при $T = 4,2\text{K}$ сильно подавлено. Полученные нами данные показывают, что этот процесс становится пренебрежимо малым лишь при температурах $T \leq 2,8\text{K}$, когда основным источником свободных носителей становится выброс за счет оже-процесса. В диапазоне температур $2,8 - 2\text{K}$ сигнал становится экспоненциальным с постоянной времени 750 мксек (рис. 1, д). В этом случае СВЧ проводимость обусловлена оже-электронами [14]. При дальнейшем понижении температуры происходит существенная деформация сигнала СВЧ проводимости: при $T = 1,3\text{K}$ (рис. 1, ж) экспонента меняет полярность и имеет постоянную времени $\approx 500 \text{ мксек}$. При этом основной вклад в СВЧ проводимость вносят не свободные носители (их концентрация мала), а сама капля. Это легко понять, поскольку большая капля выталкивает СВЧ поле, что и обуславливает расстройку резонатора. Кинетика этого сигнала описывает распад капли и дает возможность определить непосредственно ее время жизни $\tau_0 = 500 \text{ мксек}$.

Изменение величины расстройки, вызванной эффектом выталкивания поля из капли, дали величину $\sim 1,5 \text{ Мгц}$ при максимальном уровне возбуждения, что позволило оценить размер ЭДК $R \approx 1 \text{ мж}$. Отсюда, зная энергию, возбуждающего импульса, легко найти плотность частиц в капле. Мы получили $n_0 = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что согласуется с теоретическими оценками [11, 12].

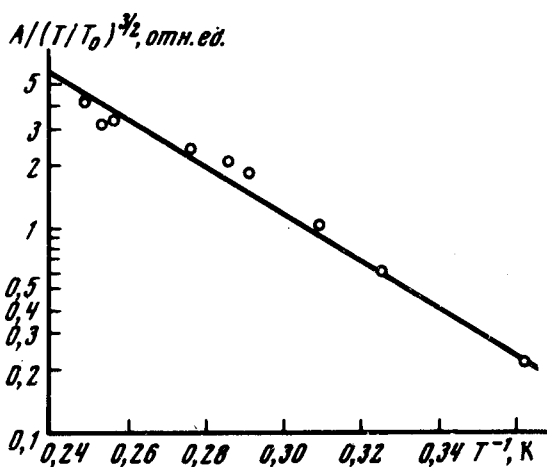


Рис. 2. Зависимость амплитуды квазистационарного участка сигнала от температуры. Наклон прямой $\ln A/(T/T_0)^{3/2}$ от $1/T$ дает возможность найти энергик связи частиц в большой ЭДК $E_0 = 4,6 \text{ мэв}$

Исследования СВЧ пробоя экситонного газа показали, что в присутствии большой капли происходит "горящий" пробой экситонов, длящийся все время СВЧ импульса. Время существования пробоя после лазерного импульса совпадает с длительностью квазистационарного участка сигнала СВЧ проводимости и составляет несколько миллисекунд в зависимости от уровня возбуждения. Порог пробоя увеличивается монотонно при увеличении времени задержки. Характерные черты СВЧ пробоя экситонного газа в присутствии большой капли коренным образом отличаются от случая СВЧ пробоя в недеформированном Ge, изученного подробно в [13]. Отсутствие острого пробойного пика и минимума порога пробоя свидетельствует о том, что одна большая капля из-за резкого уменьшения ее поверхности (примерно в 100 раз по сравнению с

облаком мелких капель) не оказывает влияния на развитие электронной лавины, и пробой экситонов происходит, как в обычном газе.

Таким образом, проведенные в настоящей работе исследования подтверждают существование в деформированном Ge одной большой электронно-дырочной капли радиусом 1 мм с плотностью частиц $n_0 \approx 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, с энергией связи $E_0 \approx 4,6 \text{ мэв}$ и временем жизни $\tau_0 \approx 500 \text{ мксек}$

В заключение авторы выражают благодарность Л.В.Келдышу за полезные обсуждения.

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

Поступила в редакцию
28 июня 1976 г.

Литература

- [1] R.S.Markiewicz, J.P. Wolfe, C.D.Jeffries. Phys. Rev. Lett., **32**, 32, 1357, 1974.
- [2] J.P. Wolfe, R.S.Markiewicz, C.Kittel, C.D.Jeffries. Phys. Rev. Lett., **34**, 275, 1975.
- [3] J.P.Wolfe, R.S.Markiewicz, S.M.Kelso. Bull. Am. Phys. Soc., **20**, 471, 1975.
- [4] J.P.Wolfe, W.L.Hansen, E.E.Haller, R.S.Markiewicz C.Kittel, C.D.Jeffries. Phys. Rev. Lett., **34**, 1292, 1975.
- [5] Я.Е.Покровский, К.И.Свистунова. Письма в ЖЭТФ, **23**, 110, 1976.
- [6] J.Balslev. Phys. Rev., **143**, 636, 1966.
- [7] В.С.Багаев, Т.И.Галкина, О.В.Гоголин, Л.В.Келдыш. Письма в ЖЭТФ, **10**, 309, 1969.
- [8] В.С.Багаев, Т.И.Галкина, О.В.Гоголин. Краткие сообщения по физике, ФИАН СССР, **2**, 42, 1970.
- [9] C.Benoit'a la Guillaume, M.Voos, F.Salvan. Phys. Rev., **B5**, 3079, 1972.
- [10] А.С.Алексеев, В.С.Багаев, Т.И.Галкина. ЖЭТФ, **63**, 1020, 1972.
- [11] M.Combescot, R.Nozieres. J. Phys. C: Proc. Phys. Soc., London, **5**, 2369, 1972.
- [12] P.Vashishta, S.G.Das, K.S.Singwi. Phys. Rev. Lett., **33**, 911, 1974.
- [13] Л.В.Келдыш, А.А.Маненков, В.А.Миляев, Г.Н.Михайлова. ЖЭТФ, **66**, 2178, 1974.
- [14] А.А.Маненков, В.А.Миляев, Г.Н.Михайлова, В.А.Санина, А.С.Сефедов. ЖЭТФ, **70**, 695, 1976.