

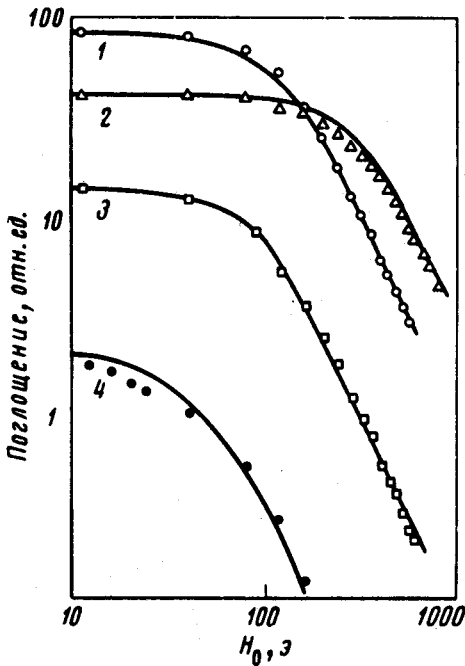
## ТОКИ ФУКО В ЭЛЕКТРОН-ДЫРОЧНЫХ КАПЛЯХ В ГЕРМАНИИ

*А.С.Каминский, Я.Е.Покровский*

Исследовано поглощение, вызванное фотовозбуждением германия при 2 К в скрещенных переменном (8 – 30 МГц) и постоянном магнитных полях. Поглощение объяснено возбуждением токов Фуко в электрон-дырочных каплях (ЭДК). Оценены характерные времена релаксации проводимости ЭДК.

Переменное магнитное поле должно возбуждать в электрон-дырочных каплях (ЭДК) токи Фуко, приводящие к появлению высокочастотных (ВЧ) потерь. Для измерения потерь использовался серийный прибор типа Ш 1-1, в катушку индуктивности колебательного контура ко-

торого помещались образцы германия. Для исключения влияния ВЧ электрического поля между образцом и катушкой вставлялся разрезной экран из латунной фольги, имевший отверстия для входа возбуждающего и выхода рекомбинационного излучений. Образцы бездислокационного дырочного германия с остаточной концентрацией примесей  $N$ , равной  $10^{11}$  и  $10^{14}$   $\text{см}^{-3}$  имели форму параллелепипедов размером  $4 \times 4 \times 2$   $\text{мм}^3$  с гранями, соответствовавшими плоскостям (100). Образцы можно было подвергать неоднородному сжатию с помощью капронового штифта диаметром 1,6  $\text{мм}$ , к которому прилагалось усилие  $F$  в направлении (001). При таком сжатии, согласно [1], в образце возникает не облако мелких ЭДК, а лишь четыре ЭДК, расположенные под штифтом в направлениях (111). Образцы возбуждались либо импульсами азотного лазера с длиной волны 0,337  $\text{мкм}$ , энергией в импульсе  $\approx 10^{-5}$   $\text{дж}$  и длительностью 40  $\text{нсек}$ , либо излучением аргонового лазера мощностью 70  $\text{вт}$ , прерываемым с частотой 670  $\text{гц}$ . При возбуждении образцов добротность колебательного контура изменялась и возникала модуляция напряжения ВЧ колебаний. Низкочастотная составляющая сигнала детектировалась, усиливалась и осциллографировалась. Одновременно осциллографировался сигнал рекомбинационного излучения ЭДК. Постоянное магнитное поле  $H_0$  прилагалось перпендикулярно катушке в направлении (010) относительно образца.



Зависимость ВЧ поглощения германия от магнитного поля  $H_0$  при 2 К и квазистационарном возбуждении аргоновым лазером мощностью 70  $\text{вт}$ :  
 1 —  $N = 10^{11}$   $\text{см}^{-3}$ ,  $F = 20$   $\text{кГ}$ ,  $f = 19,8$   $\text{Мгц}$ ,  $\tau = 1 \cdot 10^{-10}$   $\text{сек}$ ;  
 2 —  $N = 10^{14}$   $\text{см}^{-3}$ ,  $F = 20$   $\text{кГ}$ ,  $f = 19,8$   $\text{Мгц}$ ,  $\tau = 3 \cdot 10^{-11}$   $\text{сек}$ ;  
 3 —  $N = 10^{11}$   $\text{см}^{-3}$ ,  $F = 20$   $\text{кГ}$ ,  $f = 8,8$   $\text{Мгц}$ ,  $\tau = 1 \cdot 10^{-10}$   $\text{сек}$ ;  
 4 —  $N = 10^{11}$   $\text{см}^{-3}$ ,  $F = 0$ ,  $f = 19,8$   $\text{Мгц}$ ,  $\tau = 2,7 \cdot 10^{-10}$   $\text{сек}$ . Сплошные кривые рассчитаны для указанных значений  $\tau$

Величина и форма сигналов рекомбинационного излучения и ВЧ поглощения при 2 К и  $H_0 = 0$  сильно зависела от величины деформирующего усилия  $F$ . В отсутствие деформации сигнал ВЧ поглощения в образце с  $N = 10^{14}$   $\text{см}^{-3}$  не превышал уровня шумов. В образце с  $N = 10^{11}$   $\text{см}^{-3}$  постоянная времени релаксации  $\tau_0$  рекомбинационного из-

лучения и ВЧ поглощения была равна 40  $\mu\text{сек}$ , что типично для облака мелких ЭДК [2]. При оптимальном усилии  $F \approx 20 \text{ кГ } \tau_0$  возрастало до 400  $\mu\text{сек}$ , что указывало на формирование больших ЭДК [1]. При этом в условиях квазистационарного возбуждения интенсивность рекомбинационного излучения возрастала приблизительно втрое, сигнал ВЧ поглощения в образце с  $N = 10^{11} \text{ см}^{-3}$  увеличивался в 40 раз, а в образце с  $N = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  — более, чем на два порядка величины.

Магнитное поле  $H_0$  резко уменьшало ВЧ поглощение (рисунок). Из рисунка видно, что в области больших полей поглощение убывает пропорционально  $H_0^2$ . Область полей, в которой начинался спад поглощения, зависела от величины деформирующего усилии  $F$  и концентрации примесей в образцах  $N$ . Спад при минимальных полях  $H_0$  наблюдался для чистого образца германия в отсутствие деформации. В образце с  $N = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при  $F = 20 \text{ кГ}$  падение сигнала ВЧ поглощения начиналось в поле, на порядок величины более сильном. Абсолютная величина модуляции ВЧ сигнала, вызванная фотовозбуждением образцов при  $H_0 = 0$ , соответствовала добротности потерь  $Q = 2 \cdot 10^5$  для кривой 1 и  $Q = 8 \cdot 10^6$  для кривой 4.

Приведенные выше результаты могут быть естественно объяснены возбуждением токов Фуко в мелких и больших ЭДК. Действительно, используя выражение для потерь на токи Фуко в однородной сфере радиуса  $R$  с проводимостью  $\sigma$  [3], и пренебрегая скин-эффектом, можно представить добротность потерь для области низких частот в виде

$$Q = \frac{5}{2\pi} \frac{V_L}{V_k} \frac{c^2}{2\pi f \sigma R^2} \quad (1)$$

Здесь  $V_L \approx 1 \text{ см}^3$  — объем катушки индуктивности контура,  $V_k$  — объем, занятый всеми ЭДК,  $c$  — скорость света,  $f$  — частота. Используя выражение для проводимости собственного полупроводника в магнитном поле [4], можно положить

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + \left(\frac{eH_0\tau}{m^*c}\right)^2}; \quad \left(\frac{\tau}{m^*}\right)^2 = \frac{\tau_e\tau_h}{m_e m_h}; \quad \sigma_0 = \left(\frac{\tau_e}{m_e} + \frac{\tau_h}{m_h}\right) e^2 n_0, \quad (2)$$

где  $n_0$  — концентрация электронов и дырок в ЭДК,  $\tau_e$  и  $\tau_h$  — времена релаксации импульса электронов и дырок,  $m_e = 1,2 \cdot 10^{-28} \text{ г}$  и  $m_h = 2,5 \cdot 10^{-28} \text{ г}$  — эффективные массы электронов и дырок в германии для направлений (100). Из выражений (1), (2) и рисунка можно по зависимости поглощения от магнитного поля  $H_0$  оценить характерные времена релаксации проводимости  $\tau$  в ЭДК. Кривые, рассчитанные согласно (1), (2) для оптимальных значений  $\tau$  приведены на рисунке сплошными линиями. Из этих значений  $\tau$  были рассчитаны радиусы ЭДК  $R$ , соответствующие экспериментальным значениям добротности

потерь  $Q$  при  $H_0 = 0$ . В отсутствие деформации (кривая 4)  $\tau = 2,7 \times 10^{-10}$  сек,  $V_k = g\tau_0/n_0$ , где  $g$  — интенсивность фотовозбуждения в условиях эксперимента равная  $1,5 \cdot 10^{16}$  сек $^{-1}$ ,  $\tau_0 = 4 \cdot 10^{-5}$  сек,  $n_0 = 2,4 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$  [2]. Численная оценка показывает, что для указанных параметров и экспериментального значения  $Q = 8 \cdot 10^6$  радиус ЭДК  $R \approx 8 \cdot 10^{-4}$  см, что согласуется с размерами ЭДК, определенными по рассеянию света [2]. Отметим, что проводимость ЭДК в недеформированном чистом германии, рассчитанная согласно (2) для  $\tau = 2,7 \cdot 10^{-10}$  сек,  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  ом $^{-1}$  · см $^{-1}$ , что на два порядка величины превышает значение, определенное в [5] из измерений статической проводимости германия при больших уровнях импульсного фотовозбуждения. При неоднородной деформации, создаются лишь четыре ЭДК и  $V_k = 4(4/3)\pi R^3$ ,  $\tau_0 = 4 \cdot 10^{-4}$  сек,  $n_0 = 6 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  [1],  $\tau = 1 \cdot 10^{-10}$  сек,  $Q = 2 \cdot 10^5$ , откуда  $R \approx 10^{-2}$  см, что согласуется с [1]. Отсутствие влияния частоты  $f$  на зависимость поглощения от  $H_0$  естественно, поскольку в диапазоне частот 8 — 30 МГц выполняется условие  $2\pi f\tau \ll 1$ . Уменьшение  $\tau$  при неоднородной деформации германия может быть вызвано как уменьшением вырождения плазмы ЭДК [6], так и увеличением толщины скин-слоя в больших ЭДК из-за уменьшения  $\sigma$  в магнитном поле. Меньшая величина  $\tau$  в легированном германии связана, по-видимому, с рассеянием носителей заряда в ЭДК на нейтральных примесях. Оценка показывает [4], что при  $N \approx 10^{14}$  см $^{-3}$  вклад от такого рассеяния соответствует  $\tau \approx 10^{-10}$  сек.

Институт радиотехники  
и электроники  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
9 июля 1976 г.

### Литература

- [1] J.P.Wolfe, R.S.Markiewicz, C.D.Jeffries. Доклад на III Междунар. конф. по рассеянию света в твердых телах, Кампинас, Бразилия, 1975.
- [2] Ya.Pokrovskii. Phys. Stat. Sol., 11a, 385, 1972.
- [3] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред, М., ГИТТЛ, 1957.
- [4] Р.Смит. Полупроводники, М., ИИЛ, 1962.
- [5] M.N.Gurnee, M.Glicksman, P.W.Yu. Sol. State Comm., 11, 11, 1972.
- [6] H.Baber. Proc. Roy. Soc., A158, 383, 1937.