

следует связывать со спи-переориентационным переходом — постепенным изменением направления ОЛН от  $[111]$  к  $[100]$ . Минимуму на кривой  $E(T)$  соответствует небольшой максимум внутреннего трения  $Q^{-1}$  (при температуре  $\sim 202$  К). Максимум для  $Q^{-1}$  при 116 К может соответствовать еще одному магнитному переходу, например в веерную структуру (как в случае ориентированного поликристалла

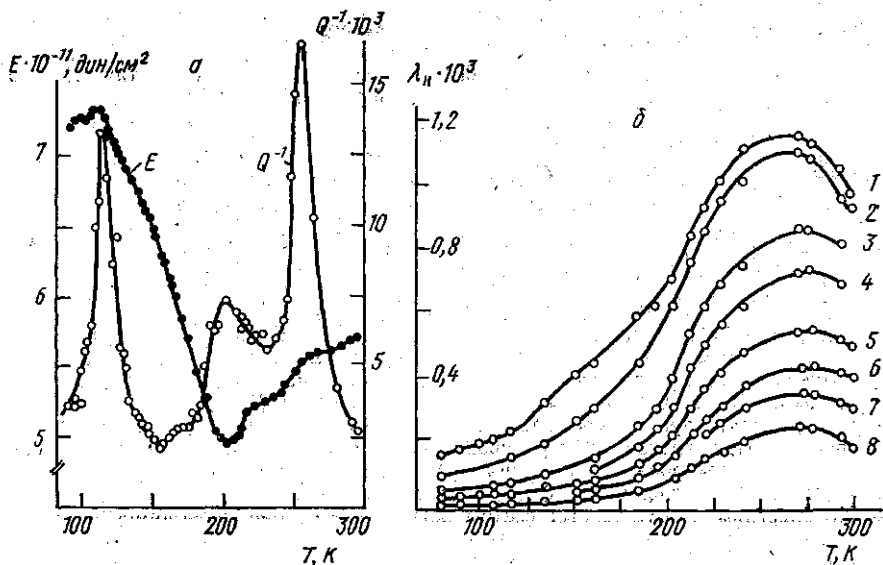


Рис. 2. Температурная зависимость модуля упругости  $E$ , внутреннего трения  $Q^{-1}$  для ориентированного поликристалла  $Tb_{0,3}Dy_{0,5}Er_{0,2}Fe_2$  (а) и продольной магнитострикции для того же образца в различных магнитных полях (б):  $H = 14,6$  (1); 8,0 (2); 3,5 (3); 2,5 (4); 1,7 (5); 1,2 (6); 1,0 (7) и 0,7 кЭ (8).

$Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_2$  [2, 5]). Что касается высокого максимума при 256 К, его природа остается пока неясной. С упомянутым переходом  $[111] \rightarrow [100]$  следует, видимо, связывать также значительный спад  $\lambda_{||}$  при понижении температуры от  $\sim 200$  К (см. рис. 2, б).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Clark A. E. AIP Conf. Proc., 1974, 18, p. 1015. [2] Koon N. C., Williams S. M. J. de Physique, 1979, 40, p. C5-194. [3] Катаев Г. И., Шубин В. В. Акуст. журн., 1980, 26, с. 142. [4] Николаев В. И., Русаков В. С. Мёссбауэровские исследования ферритов. М.: Изд-во МГУ, 1985. [5] Катаев Г. И. и др. ФММ, 1984, 58, с. 613.

Поступила в редакцию  
28.03.85

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1985, Т. 26, № 6

УДК 621.315.592

### О ФОТОРАЗОГРЕВЕ ЭЛЕКТРОНОВ В КОМПЕНСИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ

И. А. Курова, А. М. Идалбаев

(кафедра физики полупроводников)

В работе [1] наблюдались осцилляции в спектрах примесной фотопроводимости компенсированного германия  $n$ -типа, легированного золотом и сурьмой, в случае генерации электронов с нейтральной сурьмы при низких температурах. В компенсированных полупроводниках такие осцилляции возможны при фоторазогреве носителей, и обусловлены они осцилляциями либо подвижности, либо времени жизни носителей.

дающих вклад в фотопроводимость [2, 3]. Кроме того, осцилляции в [1] имели ряд особенностей по сравнению с осцилляциями фотопроводимости в Ge  $p$ -типа [2]. Поэтому с целью изучения фоторазогрева электронов в настоящей работе исследовалась стационарная фотопроводимость и фото-Холл-эффект в компенсированном золотом и сурьмой германии  $n$ -типа.

Характеристики исследованных образцов приведены в таблице. Там же приведена эффективная концентрация  $N_s$  заряженных центров в этих образцах в условиях оптической перезарядки уровней: перехода электронов с трехзарядного золота на ионы сурьмы. Такая перезарядка примесей имела место в наших опытах при подсветке тепловым фоном и лампой накаливания через фильтр из InSb или излуче-

№ образца	$N_{Au} \cdot 10^{-14}, \text{см}^{-3}$	$N_{Sb} \cdot 10^{-14}, \text{см}^{-3}$	$N_{Au}^2 \cdot 10^{-14}, \text{см}^{-3}$	$N_{Au}^3 \cdot 10^{-14}, \text{см}^{-3}$	$N_s \cdot 10^{-14}, \text{см}^{-3}$
1	3,1	7,9	1,4	1,7	18,6
2	8,2	17,6	7	1,2	49,2
3	9,4	19,4	8,6	0,8	31,2

нием  $\text{CO}_2$ -лазера. Из таблицы видно, что в образцах была большая концентрация ионов золота и сурьмы. Это обуславливает малое время жизни электронов  $\tau_r$  при низких температурах, когда рекомбинация электронов идет на заряженных ионах сурьмы, а также большие величины  $\epsilon_p$  и  $E_1$  ( $\epsilon_p$  — энергия протекания,  $E_1$  — энергия в зоне проводимости, при которой происходит смена механизмов рассеяния импульса электронов). При низких температурах  $\tau_r \gg \tau_e$ ,  $\epsilon_p \gg kT$ ,  $E_1 > \epsilon_p$  ( $\tau_e$  — время релаксации энергии электрона до значения  $\epsilon_p$ ). Таким образом, в исследованных образцах выполняются условия для фоторазогрева носителей — неравновесного распределения по энергиям возбужденных светом электронов в зоне проводимости [3].

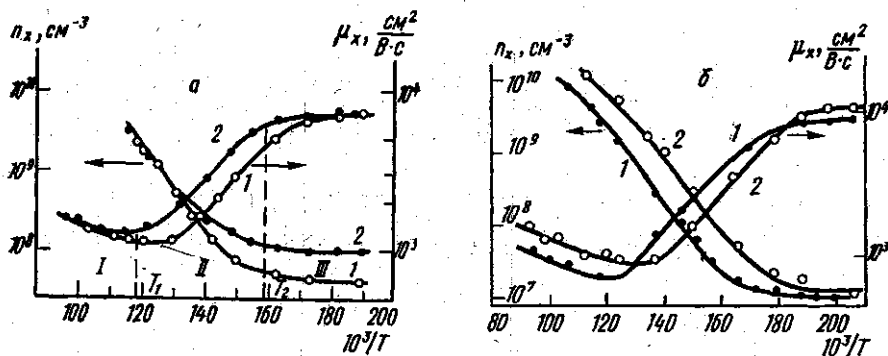


Рис. 1. Температурные зависимости холловских концентрации  $n_x$  и подвижности  $\mu_x$  электронов при подсветке образца 1 излучением от  $\text{CO}_2$ -лазера через фильтр InSb с различной интенсивностью ( $W_2 > W_1$ ) — а и при подсветке образца 2 от лампы накаливания через фильтры из InSb (1) и Ge (2) — б

На рис. 1 показаны температурные зависимости холловских концентрации и подвижности электронов в образцах 1 и 2 при освещении лазерным излучением различной интенсивности через фильтр из InSb (а) и в образце 2 при подсветке от лампы накаливания через фильтры из InSb и Ge, т. е. при различном спектральном составе подсветки (б).

Температурный интервал, где проводились исследования, можно разбить на три области (см. рис. 1, а): в области I ( $T > T_1$ ) осуществляется тепловая генерация электронов с уровня сурьмы, в области III ( $T < T_2$ ) — оптическая генерация, в области II ( $T_2 < T < T_1$ ) — тепловая и оптическая скорости генерации сравнимы и по мере понижения температуры скорость световой генерации становится преобладающей. Из рис. 1 видно, что температурная зависимость  $\mu_x(T)$  аномальна: в области II  $\mu_x$  резко возрастает с понижением температуры, в области III стремится к насыщению. Такая зависимость  $\mu_x(T)$  возможна в случае, если не термализуются электроны, возбужденные светом глубоко в зону, где подвижность при рассеянии на заряженных примесях велика. Тогда по мере роста доли таких фотовозбужденных электронов при понижении температуры в области II холловская подвижность возрастает.

тает. В области III уже практически все электроны возбуждаются в зону светом и холловская подвижность стремится к насыщению.

Остановимся на других обнаруженных закономерностях. Интенсивность лазерного излучения не влияет на величины подвижностей  $\mu_{\text{HT}}$  и  $\mu_{\text{XC}}$  (т. е. подвижностей в областях I и III), так как предельная перезарядка примесей и, следовательно,  $N_0$  не зависит от интенсивности монохроматической подсветки. А температуры  $T_1$  и  $T_2$  — нижняя и верхняя границы соответственно областей I и III — при большей интенсивности лазерной подсветки естественно смещаются в область более высоких температур.

В случае подсветок разного спектрального состава (см. рис. 1, б) перезарядка больше при освещении через фильтр из Ge, так как максимальное значение энергии кванта света, прошедшего через фильтр, в этом случае достаточно для оптической генерации электронов и со второго акцепторного уровня золота  $E_1 = E_c - 0,2$  эВ. Таким образом осуществляется дополнительная перезарядка уровней золота и сурьмы и, следовательно, уменьшается  $N_0$  и увеличиваются  $\mu_{\text{HT}}$  и  $\mu_{\text{XC}}$ , так как  $\mu_{\text{XC}} \sim \mu_{\text{HT}} \sim 1/N_0$  при рассеянии импульса на заряженных примесях [2, 4]. Температуры  $T_1$  и  $T_2$  для фильтра Ge ниже, что обусловлено, по-видимому, меньшей скоростью оптической генерации электронов с

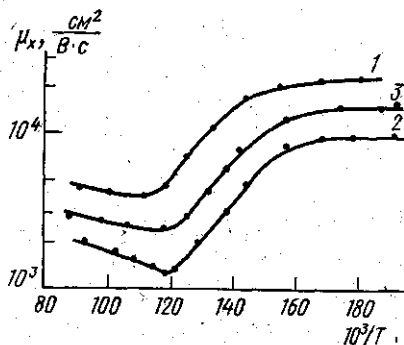


Рис. 2. Температурные зависимости  $\mu_x$  для разных образцов при подсветке через фильтр InSb. Кривые 1, 2, 3 соответствуют образцам 1, 2, 3

сурьмы в этом случае. Последнее согласуется с меньшей величиной отношения  $n_x$  кривой 2 к  $n_x$  кривой 1 в области оптической генерации (III) по сравнению с этим отношением в области тепловой генерации (I).

На рис. 2 показаны температурные зависимости холловской подвижности для образцов с различной концентрацией  $N_0$  при одинаковой интенсивности подсветки через фильтр из InSb. Видно, что величины  $\mu_{\text{HT}}$  и  $\mu_{\text{XC}}$  уменьшаются при увеличении  $N_0$  пропорционально  $1/N_0$ , как в случае рассеяния на заряженных примесях. В то же время отношение  $C = \mu_{\text{XC}}/\mu_{\text{HT}}$  при возрастании  $N_0$  увеличивается слабо: при  $T = 5,4$  К для образца 1  $C \approx 10$ , для образца 2  $C \approx 12$  (значение  $\mu_{\text{HT}}$  для оценки  $C$  определялось путем экстраполяции  $\mu_{\text{HT}}$  на область низких температур). Для слабого фоторазогрева [5]

$$C = \frac{\mu_{\text{XC}}}{\mu_{\text{HT}}} = \frac{\tau_e}{\tau_r} \cdot \frac{E_1}{kT}, \quad (1)$$

где  $E_1 \sim N_0^{1/2}$ , а  $\tau_r$  уменьшается с увеличением концентрации рекомбинационных центров, т. е. с увеличением  $N_0$ . Отсюда  $C \sim N_0^m$ , где  $m > 1/2$ . И следовательно, (см. таблицу)  $C(N_0)$  изменяется значительно меньше, чем при слабом разогреве, согласно (1).

Таким образом, установлено, что отношение  $\mu_{\text{XC}}/\mu_{\text{HT}}$  велико, слабо зависит от  $N_0$  и состава подсветки, а  $\mu_{\text{XC}}$  слабо зависит от  $T$ . Все это свидетельствует о наличии сильного фоторазогрева электронов при низких температурах в компенсированном германии с многоразрядными примесными центрами.

В заключение авторы выражают благодарность А. Г. Миронову за полезные дискуссии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Курова И. А., Ормонт Н. Н. ФТП, 1982, 16, с. 905. [2] Besfamilpaу A. et al. Phys. Stat. Sol., 1967, 24, p. 757. [3] Абакумов В. И., Яссневич И. Н., Перель В. И. ЖЭТФ, 1977, 72, с. 674. [4] Миронов А. Г. Изв. вузов. Физика, 1984, № 2, с. 13. [5] Коган Ш. М. ФТП, 1977, 11, с. 1979.

Поступила в редакцию  
24.04.85