

## ИЗУЧЕНИЕ ЛОВУШЕК ОКСИДА $\text{InSb}$ МЕТОДОМ ТСТ

В. С. Вавилов, А. Ф. Плотников, А. А. Соколова,  
В. Э. Щубин

В последнее время увеличилось число работ, в которых изучаются процессы перезарядки ловушек диэлектрика в МДП-структурах. Вызвано это прежде всего широкими перспективами, открывающимися при использовании таких структур в качестве устройств для запоминания как электрической, так и оптической информации /1,2/.

В настоящей работе исследуются процессы термического опустошения предварительно заряженных ловушек оксида  $\text{InSb}$  при нагреве структуры  $\text{Au}$ -оксид  $\text{InSb} - \text{InSb}$  от  $80^\circ$  до  $400^\circ\text{K}$ . Полученные экспериментальные результаты используются для определения таких параметров ловушек, как сечения захвата  $S_c$  и их энергетического положения  $E_c$  в запрещенной зоне оксида.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Исследуемые образцы представляли собой структуры  $\text{Au}$ -оксид  $\text{InSb} - \text{InSb}$ , которые изготовлялись по технологии, описанной ранее /3/. На монокристаллических кристаллах  $\text{InSb}$   $n$ -типа с концентрацией доноров порядка  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  наращивались слои оксида  $\text{InSb}$  толщиной  $1500 \text{ \AA}$ . В качестве металлического электрода на оксиде методом вакуумного распыления наносился полупрозрачный слой золота. Вторым электродом на  $\text{InSb}$  служил выплавленный в полупроводник индий. Готовый образец помещался в криостат, где его температура могла поддерживаться постоянной в пределах от  $80^\circ\text{K}$  до  $400^\circ\text{K}$ . Кроме того конструкция криостата предусматривала возможность нагрева образца в указанных температурных пределах с требуемой постоянной скоростью.

Зарядка ловушек оксида  $\text{InSb}$  осуществлялась при азотной температуре путем освещения структуры светом видимого спектрально-

го диапазона. Как было показано /4/, при этом происходит накопление отрицательного заряда в оксиде за счет изменения зарядового состояния ловушек, локализованных в оксиде. Поверхностная плотность отрицательного заряда, захваченного ловушками  $N_c$ , определялась из величины сдвига вольт-емкостной характеристики (C-V) по формуле

$$\Delta N = \epsilon_0 \Delta V / qd, \quad (1)$$

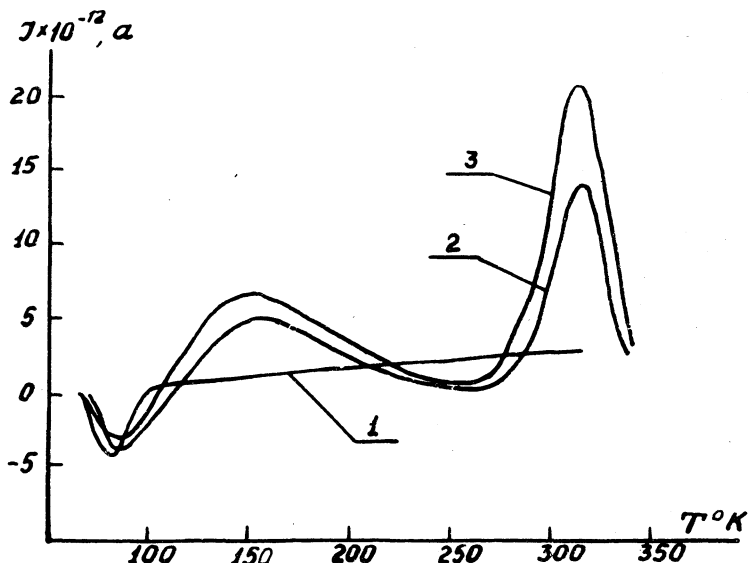
где  $\epsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость оксида  $\Delta V$  - сдвиг C-V характеристики,  $q$  - заряд электрона,  $d$  - толщина оксида. Измерение вольт-емкостной характеристики производилось дважды на частоте 1 МГц: до освещения структуры и после него, причем оба раза в темноте.

Наблюдение за термическим опустошением ловушек при нагреве образца проводилось по разрядному (термостимулированному) току, измеряемому электрометрическим усилителем. Кривые ТСТ записывались на диаграммной ленте самописца. Помимо методики ТСТ для контроля за величиной заряда, оставшегося на ловушках после нагрева образца до данной температуры, производилось измерение величины сдвига вольт-емкостной характеристики относительно исходной в зависимости от температуры нагрева.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены зависимости величины термостимулированных токов от температуры образца. Кривая 1 получена на неосвещенной структуре (отрицательный объемный заряд в оксиде отсутствует). Кривые 2 и 3 снимались после предварительного освещения структуры светом длиной волны 0,5 мкм. В случае 3 поверхностная концентрация заряженных ловушек была примерно вдвое больше, чем в случае 2, и составляла  $3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и  $1,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  соответственно. Кривые ТСТ снимались в отсутствие смещения на структуре. Скорость нагрева образца составляла около 0,6 град/сек. Как видно из рис. 1, низкотемпературный максимум тока отрицательной полярности, соответствующий температуре  $T_M = 80^\circ \text{K}$ , наблюдается на всех трех кривых. Можно предположить, что этот максимум тока, не связанный с предварительным освещением образца, обусловлен перезарядкой приповерхностных ловушек оксида  $\text{In}_2\text{O}_3$  вследствие изменения положения уровня Ферми в  $\text{In}_2\text{O}_3$  с ростом температуры /5/.

Два других максимума на кривых 2 и 3 появляются в результате термической разрядки объемных ловушек оксида, предварительно заряженных светом, и исчезают после отогрева.



Р и с. 1. Кривые термостимулированного тока, полученные до освещения структуры (1) и после зарядки структуры до значений поверхностной концентрации ловушек  $1,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (2) и  $3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (3).

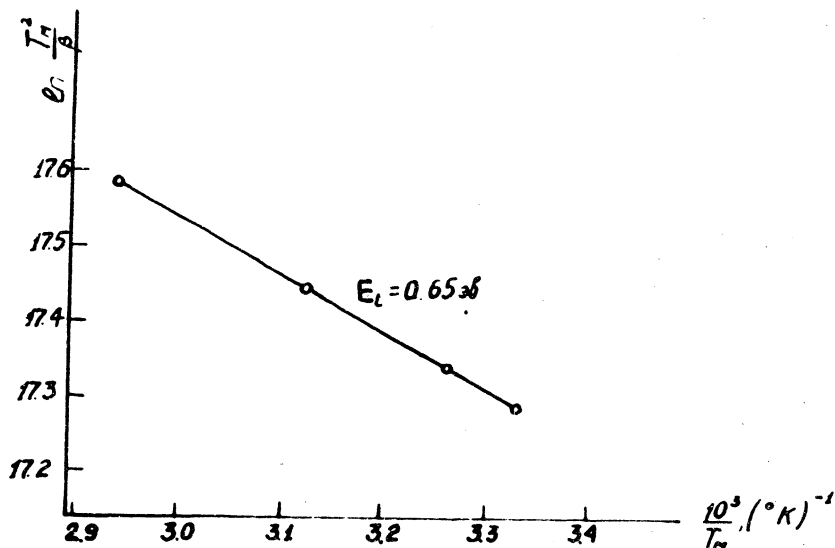
Анализ кривых ТСТ проводился по методу Хогенстратена и Бьюба /6,7/. Энергетическое положение ловушек вычислялось по величине максимальной проводимости, наблюдаемой при температуре  $T = T_{\text{max}}$ , исходя из условия, что при максимальной проводимости положение уровня Ферми совпадает с положением уровня, соответствующего ловушкам

$$E_c = kT_M \ln \nu, \quad (2)$$

где  $T_M$  - температура максимума,  $\nu$  - частотный фактор, равный  $\nu = N_c S_t v$ ,  $S_t$  - сечение захвата электронов.

Сечение захвата ловушками электронов оценивалось, исходя из предположения, что имеет место слабый перезахват. Это пред-

положение вполне оправдано для максимума с  $T_M \approx 140^\circ\text{K}$ , так как для него наблюдается сдвиг положения максимума ТСТ в сторону низких температур с увеличением заряда на ловушках. (На рис. I



Р и с. 2. Зависимость смещения максимума тока ( $T_M \approx 310^\circ\text{K}$ ) от скорости нагрева образца.

максимум кривой 3 при  $T \approx 140^\circ\text{K}$  сдвинут влево по отношению к соответствующему максимуму кривой 2).

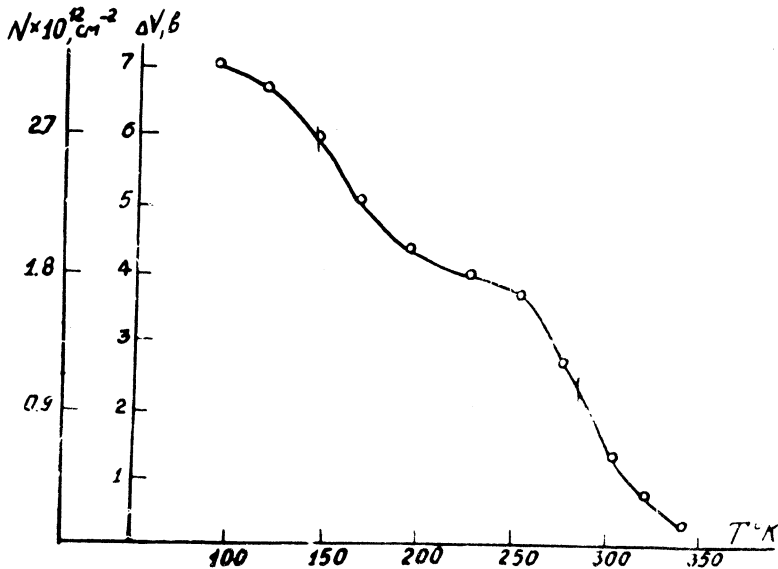
Чтобы обосновать предположение о слабом перзахвате для высокотемпературного максимума  $T_M \approx 310^\circ\text{K}$  было исследовано смещение максимума тока в зависимости от скорости нагрева образца /6,8/. На рис. 2 представлен график зависимости  $\ln(T_M^2/\beta) = f(1/T_M)$ , где  $T_M$  - температура, соответствующая максимуму тока,  $\beta$  - скорость нагрева. Наклон этой кривой дает значение  $E_t$ , равное 0,65 эВ, что удовлетворительно согласуется со значением глубины ловушек, рассчитанным по положению уровня Ферми при различных скоростях нагревания.

В таблице I приведены параметры объемных ловушек оксида (энергетическое положение  $E_t$  и сечение захвата  $S_t$ ), рассчитанные из экспериментальных данных рис. I

Таблица I

$E_t$ , эВ	$S_t$ , см <sup>2</sup>	$E_{тсв}$ , эВ	$N_t$ , см <sup>-2</sup>
0,30	$1,1 \cdot 10^{-17}$	0,32	$1,2 \cdot 10^{12}$
0,62	$2 \cdot 10^{-18}$	0,58	$2 \cdot 10^{12}$

Наблюдение за изменением величины отрицательного заряда, локализованного на объемных ловушках оксида  $InSb$ , при нагревании образца до заданной температуры производилось по сдвигу вольт-емкостной характеристики структуры. При этом  $C-V$ -характеристика сначала измерялась до нагрева образца (сразу после облучения его светом), а затем после каждого нагрева структуры до данной температуры, при которой образец выдерживался 2-3 минуты. Все измерения проводились в темноте при температуре  $78^{\circ}K$ . На рис. 3 по-



Р и с. 3. Температурная зависимость сдвига вольт-емкостной ( $C-V$ ) характеристики  $\Delta V$ . Слева отложены значения поверхностной плотности перезаряжаемых ловушек  $N_t$ .

казана зависимость сдвига вольт-эмиссионной характеристики  $\Delta V$  до температуры нагрева образца  $T$ . Величина  $\Delta V$  отсчитывается от исходной  $C-V$  характеристики, полученной до зарядки ловушек оксида  $InSb$ . Слева по оси ординат на графике рис. 3 отложены значения поверхностной плотности перезаряжаемых ловушек  $N_c$ , определенные по формуле  $/I/$ . Видно, что участки с наибольшей крутизной (наиболее интенсивное опустошение ловушек) соответствуют примерно тем же значениям температуры, при которых наблюдались максимумы ТСТ на кривых 2 и 3 рис. 1. Наклон кривой рис. 3 на этих участках пропорционален  $E_c/kT/9/$ . Это позволяет независимо определить энергию активации ловушек  $E_{c0}$ , которые представлены в третьей строке таблицы I. Как видно, эти величины хорошо согласуются со значениями, полученными из кривых ТСТ. В четвертой строке таблицы I даны поверхностные концентрации "мелких" ( $E_c = 0,30$  эВ) и "глубоких" ( $E_c = 0,62$  эВ) ловушек, определенные из кривой рис. 3.

Поступила в редакцию  
12 мая 1972 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. E. C. Ross, I. J. Wallmark. *RSA Rev.*, **20**, 366 (1969).
2. G. F. Vanstone. *Electron. Letts.*, **8**, 13 (1972).
3. В. С. Вавилов, А. Ф. Плотников, В. Э. Шубин. *ФТП*, **4**, 598 (1970).
4. В. С. Вавилов, А. Ф. Плотников, А. А. Соколова, В. Э. Шубин. Кр. сообщения по физике ФИАН, № 4, 40 (1971).
5. В. С. Вавилов, А. Ф. Плотников, В. Э. Шубин. *ФТП*, **5**, 2064 (1971).
6. W. Hoogenstraten. *Philips Res. Rept.*, **13**, 515 (1958).
7. Р. Бьёб. Фотопроводимость твердых тел. И. Л., Москва, 1962 г.
8. L. Lazzabaterre, G. Seve, J. Mandolina. *Thin Solid Films*, **6**, 381 (1970).
9. P. Gray, D. Brown. *Appl. Phys. Letts.*, **8**, 31 (1966).