

- [1] R i c h t m y e r R.D. - *Communs. Pure and Appl. Math.*, 1960, XIII, N 2, p. 297-319.
- [2] М е ш к о в Е.Е. В сб.: Исследование гидродинамической устойчивости с помощью ЭВМ / Под ред. Бабенко К.И., ИМП им. М.В. Келдыша, 1981, с. 163-190.
- [3] З а й ц е в С.Г., Л а з а р е в а Е.В., Ч е р н у х а В.В., Б е л я е в В.М. - *ДАН СССР*, 1985, т. 283, № 1, с. 94-98.

Поступило в Редакцию
12 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 12

26 июня 1988 г.

АКТИВАЦИОННЫЙ ХАРАКТЕР ОПТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ EL_2 ЦЕНТРОВ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Е.И. О б о р и н а, С.С. О с т а п е н к о,
М.К. Ш е й н к м а н

Дефекты, принадлежащие семейству EL_2 в полуизолирующем $GaAs$, являются объектом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований [1]. Это обусловлено не только их практически важной ролью компенсирующих центров, но и не выясненной до конца природой, отвечающей за довольно сложный энергетический спектр и ряд нетривиальных свойств. Среди последних - эффект „утомления“, состоящий в уменьшении во времени соответствующего сигнала емкости, фотопроводимости или фотолюминесценции (ФЛ) от начального значения до некоторого стационарного под действием света из энергетического интервала $\hbar\nu_{\text{IT}} = 1.0-1.3$ эВ при $T < 120$ К. Данное явление связывается [1] с существованием метастабильного состояния (EL_2^*), переход в которое из основного состояния (EL_2^0) осуществляется путем фотовозбуждения электрона квантами с энергией $\hbar\nu_{\text{IT}}$ через возбужденное состояние (EL_2^B) с последующей большой решеточной релаксацией (рис. 1, а). Обратный переход $EL_2^* \rightarrow EL_2^0$ (восстановление) можно осуществить тремя путями: 1) чисто термически с преодолением барьера $A = 0.34$ эВ; 2) также термически, но с преодолением пониженного барьера $A_1 = 0.107$ эВ из-за наличия равновесных [2] или инжектированных [3] свободных электронов; 3) оптически при освещении кристалла зона-зонным или более длинноволновым „примесным“ светом. В последнем случае спектр восстановления лежит в энергетическом интервале $\hbar\nu_B = 0.7-1.0$ эВ при $T = 77$ К [4] и имеет тонкую структуру [5, 6]. Известно, что EL_2 дефекты обуславливают полосу ФЛ с максимумом $\hbar\nu_{\text{max}} = 0.65$ эВ, которая испытывает „утомление“. Однако

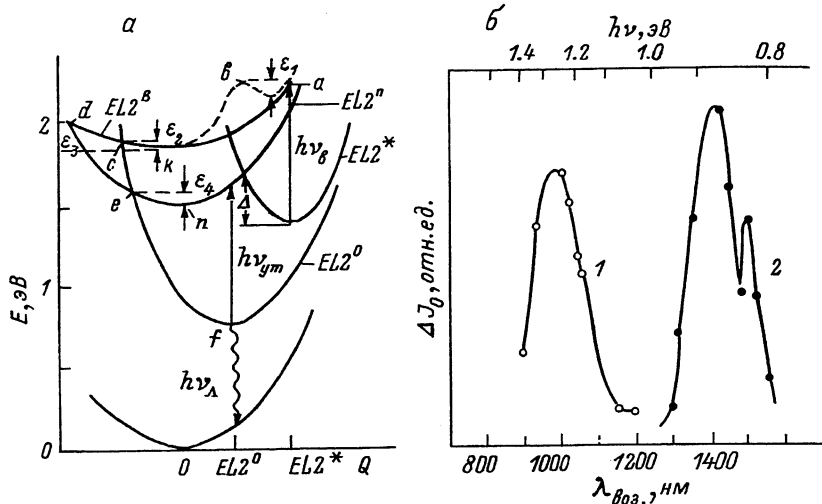


Рис. 1. а) Конфигурационная диаграмма EL_2 центра и электронные оптические переходы, определяющие процессы люминесценции ($h\nu_A$), „утомления“ ($h\nu_{\gamma}$) и восстановления ($h\nu_{\beta}$); Δ и ϵ_i – энергетические барьеры темнового и оптического восстановления; $i=1, 2, 3, 4$. б) Спектры возбуждения (1) и оптического восстановления (2) люминесценции EL_2 центров, $h\nu_A=0.65$ эВ ($T=77$ К).

в той же спектральной области 0.65–0.67 эВ наблюдается свечение и других центров ФЛ, интенсивность которых в отличие от ФЛ EL_2 центров стабильна во времени. Поэтому общая интенсивность наблюдаемой полосы ФЛ 0.65 эВ может быть представлена как сумма $J=J_{CT}+\Delta J$, где ΔJ – амплитуда изменяющейся во времени компоненты, определяемой EL_2 центрами. Несмотря на близость полос ФЛ стабильных и нестабильных центров, спектры их возбуждения радикально отличаются [6]. На рис. 1, б приведены спектры возбуждения и восстановления EL_2 люминесценции при 77 К.

В настоящей работе нами исследована температурная зависимость как кинетики процесса „утомления“ EL_2 ФЛ, так и процесса ее оптического восстановления. Следует прежде всего отметить, что были специально отобраны кристаллы, для которых наблюдается оптическое восстановление в области температур $T_B > 60$ К. Исследование в этих образцах температурной зависимости кинетики „утомления“ $\Delta J(t)$ в интервале 4.2–80 К показало, что она может быть описана экспонентой, характеристическое время спада которой практически не изменяется с температурой, варьируя, однако, от длины волны [6] и интенсивности возбуждаемого света.

Для исследования оптического восстановления при 4.2 К измерялась либо величина интенсивности EL_2 свечения в начальный

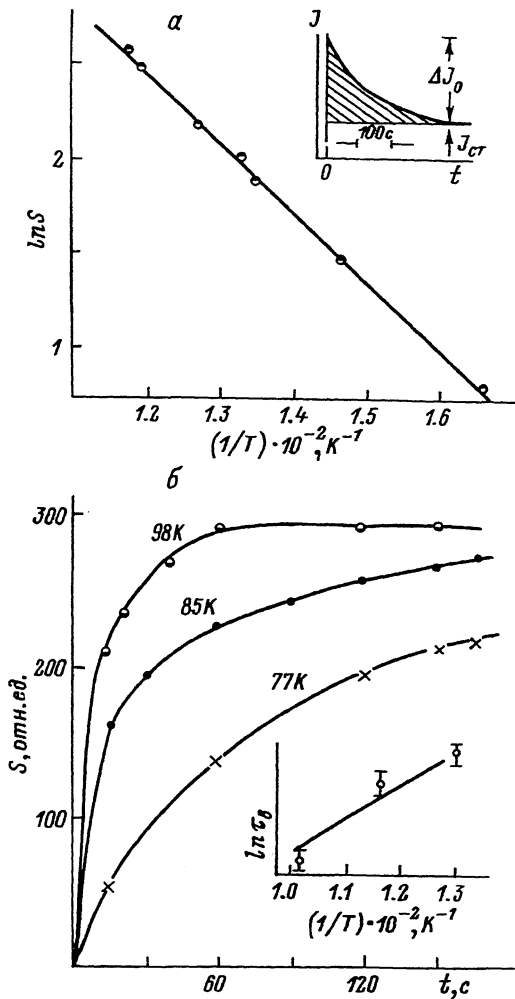


Рис. 2. а) Изохронное восстановление светосуммы S , связанной с процессом „утомления“ ФЛ, $\Delta t_B = 120$ с, $h\nu_B = 0.90$ эВ, $h\nu_A = 0.65$ эВ, $h\nu_{\text{ФЛ}} = 1.30$ эВ. На вставке – кинетика „утомления“ ФЛ с $h\nu_A = 0.65$ эВ ($T = 4.2$ К). б) Кривые изотермического восстановления светосуммы. На вставке – зависимость логарифма времени восстановления от температуры, определяющая энергию активации процесса восстановления $\tilde{E} = 50-10$ мэВ.

момент времени „утомления“ ΔJ_0 , либо величина светосуммы S , полученной путем графического интегрирования площади под кривой $\Delta J(t)$ (вставка на рис. 2, а) при 4.2 К. Легко видеть, что обе эти величины пропорциональны количеству перестраивающихся $E_L 2$

центров, находящихся в основном состоянии. Чтобы провести оптическое восстановление, образец при более высоких температурах $T_B = 60-90 \text{ K}^1$ освещался монохроматическим светом из спектрального интервала $h\nu_B = 0.8-1.0 \text{ эВ}$, либо в изохронном, либо в изотермическом режимах. В первом случае восстановление велось в течение фиксированного интервала времени $\Delta t_B = 120 \text{ с}$ и разных температурах T_B (рис. 2, а), во-втором - при фиксированных температурах T и разных временах восстановления $\Delta t_B = 1-600 \text{ с}$ (рис. 2, б).^В При больших Δt_B восстановление достигало насыщения при всех исследованных T_B . После восстановления вновь измерялись величины \mathcal{N}_0 и \mathcal{S} при 4.2 К .

В результате было обнаружено, что процесс оптического восстановления интенсивности ФЛ 0.65 эВ носит термоактивационный характер. Полученная в режиме изохронного восстановления кривая Аррениуса (рис. 2, а) определяет энергию активации соответствующего процесса $\mathcal{E} = 32 \pm 10 \text{ мэВ}$. На рис. 2, б приведены кривые изотермического восстановления светосуммы при трех значениях T_B . Они являются экспонентами с характеристическим временем восстановления τ_B , связанным с \mathcal{E} соотношением $\tau_B = \tau_0 \exp(\mathcal{E}/kT_B)$. Найденная отсюда величина \mathcal{E} (см. вставку на рис. 2, б) составляет $50 \pm 10 \text{ мэВ}$.

При анализе процесса оптического восстановления $E_L 2^* \rightarrow E_L 2^0$ предполагается [5], что селективный характер его спектра (рис. 1, б) есть следствие того, что переход осуществляется через возбужденное состояние центра $E_L 2^B$, как это имеет место и для прямого перехода $E_L 2^0 \rightarrow E_L 2^*$. Учитывая сложный характер взаимного расположения термов $E_L 2^*$, $E_L 2^B$ и $E_L 2^{\Pi}$, можно рассмотреть несколько вариантов объяснения барьера \mathcal{E} , показанных на рис. 1, а. На существование барьера \mathcal{E}_1 указывается в работе [7]: он связан с немонотонным изменением терма $E_L 2^B$ с конфигурационной координацией. В этом случае процесс восстановления определяется движением центра через точки диаграммы а - в - с - f (рис. 1, а). Можно указать и другие пути релаксации системы при оптическом восстановлении с соответствующими барьерами (рис. 1, а): (а - к - с - f) - \mathcal{E}_2 , (а - к - d - e - f) - \mathcal{E}_3 , (а - d - n - e - f) - \mathcal{E}_4 . Предполагается, что возбужденное состояние центра $E_L 2^B$ является достаточно долгоживущим.

Поскольку оптическое восстановление примесным светом наблюдается не для всех кристаллов *GaAs*, содержащих $E_L 2$ центры, то можно думать, что величина барьера \mathcal{E} варьирует от центра к центру для различных дефектов, принадлежащих семейству $E_L 2$.

В заключение заметим, что изменение термического барьера с 0.34 до 0.107 эВ при появлении электронов в с-зоне (т. н. Оже-восстановление) можно объяснить наличием у центра $E_L 2^*$ еще одного зарядового состояния, резонансного с с-зоной, отстоящего на

¹ Темновое восстановление светосуммы в интервале температур $T_L = 60-100 \text{ К}$ и $\Delta t_L = 120 \text{ с}$ практически отсутствует.

0.107 эВ от ее дна. Захват на него свободного электрона ведет к безактивационной релаксации системы в равновесное состояние $E_L 2^\circ$.

Л и т е р а т у р а

- [1] M a r t i n G.M., M a k r a m-E b e n d S. The midgap donor level in GaAs. In book „Deep centers in semiconductors”, ed. S. Pantelides, N-4, 1985, p. 399.
- [2] M i t t o n e a u A., M i r c e a A. Sol. St. Com., 1979, v. 30, N 3, p. 157-162.
- [3] V i n c e n t G., B o i s D., C h a n t r e A. - J. Appl. Phys., 1982, v. 53, p. 3643-3649.
- [4] N o j i m a S. - J. Appl. Phys., 1985, v. 58, N 9, p. 3485-3493.
- [5] F i s h e r D.W. - Appl. Phys. Lett., 1987, v. 50, N 24, p. 1751-1753.
- [6] О б о р и н а Е.И., О с т а п е н к о С.С., Ш е й н к - м а н М.К. - Письма в ЖЭТФ, 1987, т. 46, № 11, с. 449-451.
- [7] D a b r o w s k i J., S c h e f f l e r M. - Int. Conf. Def. Semicond, Budapest, 1988.

Институт полупроводников
АН УССР

Поступило в Редакцию
1 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 12

26 июня 1988 г.

ХИМИЧЕСКИЙ ОКИСЕЛ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x=0$; $x=0.23$)
ПО ДАННЫМ ЭОС

Н.Н. Б е р ч е н к о, Т.А. Г р и ш и н а, И.А. Д р а б к и н,
Ю.П. К о с т и к о в, А.В. М а т в е е н к о,
Д.А. С а к с е е в, Е.А. Т р е т ь я к о в а

В настоящее время оксиды бинарных и более сложных полупроводников находят все более широкое применение в качестве промежуточных слоев, управляющих высотой барьера и основными электрическими свойствами контактов металл-полупроводник [1, 2].

В данной работе методом электронной Оже-спектроскопии (ЭОС) (Оже-микроанализатора РН1 545 А) изучен элементный состав и химическое состояние элементов в слое оксида на $Pb_{1-x}Sn_xTe$, полученном химическим окислением.

Исходные образцы $Pb_{1-x}Sn_xTe$ ($x=0$, $x=0.23$) - эпитаксиальные слои р-типа, полученные на свежесколотых подложках BaF_2 методом мгновенного испарения в вакууме. Толщина слоев 2-3 мкмк; концентрация дырок $5-8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.