

В. И. ТРУБИН, П. И. ХУДАЕВ, Б. П. УСОЛЬЦЕВ, В. В. БЕСКРОВАНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОВУШЕК В ПРИРОДНЫХ АЛМАЗАХ
МЕТОДОМ ТЕРМОДЕПОЛЯРИЗАЦИИ

(Представлено академиком Н. В. Беловым 25 V 1973)

Ловушки в кристаллах можно исследовать по-разному и, в частности, методами термостимулированных токов, термolumинесценции, фотопроводимости (1).

Для определения уровней прилипания в природных алмазах мы применили метод термодеполяризации. Исследования проводились на установке, описанной ранее (2). Алмаз под напряжением $U=1000$ в/см облучается светом с постоянной длиной волны λ_b , при которой имеется пик фотопроводимости. Этот процесс объемной поляризации проводится либо при

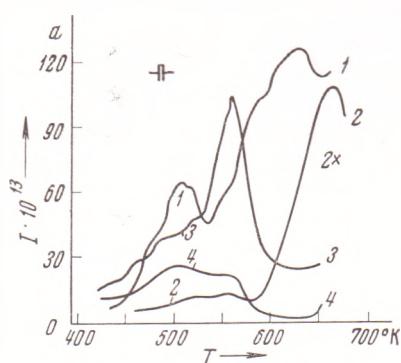


Рис. 1

Рис. 1. Ток термодеполяризации различных алмазов при $U=1000$ в/см; алмаз № 3124, $\beta=0,34^\circ/\text{сек}$, $\lambda_b=225$ м μ (1); алмаз № 3003 (2), 3060 (3, 4), $\beta=0,27^\circ/\text{сек}$, $\lambda_b=231$ м μ (2-4), облучение в течение 20 мин. при охлаждении от 700 до 293° К (1-3), при 313 (2) и 293° К (4)

Рис. 2. Ток деполяризации алмаза № 3060 при $U=1000$ в/см, $\lambda_b=275$ м μ , облучение в течение 20 мин. при охлаждении от 700 до 293° К и различных β : 1 - 0,70°/сек, 2 - 0,56; 3 - 0,31; 4 - 0,27°/сек. 5 - облучение при 313° К, $\beta=0,56^\circ/\text{сек}$

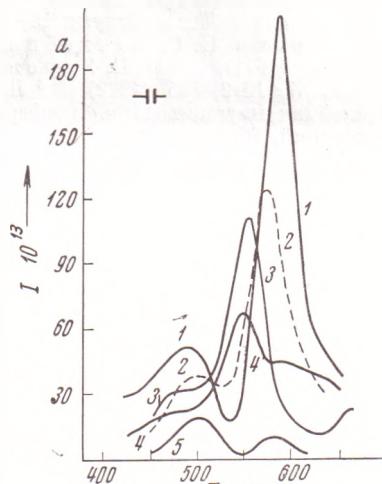


Рис. 2

постоянной температуре, либо при охлаждении от 700 до 300° К. При этом происходит разделение зарядов и захват последних ловушками. Сниается ток темновой деполяризации, а затем в отличие от фотодеполяризации (2) вместо облучения производится линейное нагревание кристалла, при этом в результате освобождения из ловушек носителей и наличия градиента в распределении зарядов в алмазе, возникает ток термодеполяризации (т.д.п.).

На рис. 1 и 2 приведены кривые т.д.п. для алмазов № 3060 (октаэдр с зеленой люминесценцией), № 3124 (октаэдр с голубовато-белесой люми-

несценцией) и № 3003 (октаэдр с ярко-голубой люминесценцией). Глубину ловушек, обусловивших максимумы и ступеньки на кривых т.д.п., можно приблизительно оценить по формуле (3)

$$E_1 \approx 25kT_m = 2,15 \cdot 10^{-3} T_m, \quad (1)$$

где T_m — температура максимума, °К.

При возрастании скорости нагревания алмаза происходит сдвиг T_m в область высоких температур и возрастает величина тока термодеполяризации (рис. 2, табл. 1). Сдвиг T_m с изменением β затрудняет сравнение

Таблица 1

Глубина ловушек у алмаза № 3060

Ловушка	β , °/сек	T_m , °К	E_1 , эв	E_2 , эв	E , эв	
					по (3)	по (4)
L_1	0,70	495	1,07	1,06	0,69	0,51
	0,56	490	1,05	1,04		
	0,31	478	1,03	0,99		
L_2	0,27	458	0,99	0,91	0,75	0,71
	0,70	587	1,26	1,49		
	0,56	573	1,23	1,42		
	0,31	555	1,19	1,32		
	0,27	548	1,17	1,30		

данных различных исследователей и, в частности, сравнение наших данных по т.д.п. с данными по термовысвечиванию алмазов.

В табл. 1 приведены данные для двух ловушек L_1 и L_2 алмаза № 3060 (рис. 2), рассчитанные методами, обычно применяемыми для анализа кривых термостимулированных токов. Энергию активации можно определить из формы пиков т.д.п. по методу, предложенному Лушником (3):

$$E_2 = kT_m^2 \delta_m^{-1}, \quad (2)$$

где δ_m — полуширина пика. Однако в ряде случаев из-за значительного перекрывания пиков т.д.п. (рис. 1, кривые 1, 4), определение E_2 затруднено. Для сравнения мы провели определение глубины ловушек другими методами (1, 3):

$$\ln \beta \approx -E(kT_m)^{-1} + \text{const}, \quad (3)$$

$$\ln(T_m^2 \beta^{-1}) \approx E(kT_m)^{-1} + \text{const}. \quad (4)$$

Глубина ловушек в этих методах определялась по наклону графика $\ln \beta$ или $\ln T_m^2 \beta^{-1}$ от T_m^{-1} (табл. 1). Как видно, глубина ловушек L_1 и L_2 , определенная по формулам (1) и (2), приблизительно в два раза больше глубины ловушек, определенной методами второй группы (по формулам (3), (4)).

Бьюб (1) наблюдал аналогичные различия для кристаллов CdS. Эти различия, вероятно, обусловлены тем, что при выводе формул (3) и (4) пре-небрегают зависимостью от температуры продолжительности жизни τ , сечения захвата S и тепловой скорости v носителей, а также плотностью состояний N_e в зоне проводимости вблизи запрещенной зоны.

В предположении, что наблюдаемые уровни захвата являются электронными ловушками, на основе экспериментальных данных (рис. 1, 2) мы провели расчет эффективных поперечных сечений захвата S_t электронов ловушками, их частотные факторы α_e и вероятности P_t освобождения электронов из ловушек глубиной E при температуре T для трех ловушек

Таблица 2

Расчетные значения α_e , S_T и P_T для трех пиков т.д.п., снятых при $\beta = 0,27^\circ/\text{сек}$

$T_m, ^\circ\text{K}$	$\delta_m, ^\circ\text{K}$	$\frac{E-E_2}{\text{эв}}$	$\alpha_e \cdot 10^{10}, \text{сек}^{-1}$	$S_T \cdot 10^{18} \text{ см}^2$		P_T			
				$T=300^\circ\text{K}$	$T=T_m$	$T=500^\circ\text{K}$	$T=600^\circ\text{K}$	$T=700^\circ\text{K}$	$T=T_m$
662	25	1,51	3,23	2,8	0,57	$2,02 \cdot 10^{-6}$	$8,15 \cdot 10^{-4}$	$6,15 \cdot 10^{-2}$	0,0122
619	23	1,43	5,53	4,8	1,43	$2,34 \cdot 10^{-5}$	$6,35 \cdot 10^{-3}$	$3,42 \cdot 10^{-1}$	0,0127
548	20	1,30	10,7	9,3	2,78	$8,9 \cdot 10^{-4}$	0,45		0,448

глубиной 1,51, 1,43 и 1,30 эв (см. табл. 2). Величины α_e , S_T и P_T рассчитывались по формулам (1, 3)

$$\alpha_e = \beta E (kT_m)^{-1} \exp(E/kT_m),$$

$$S_T = \alpha_e (v_e N_c)^{-1},$$

$$P_T = \alpha_e \exp(-E/kT).$$

Из табл. 2 видно, что S_T и P_T у более глубоких ловушек меньше. С ростом T величина S_T плавно уменьшается, тогда как величина P_T резко возрастает, что будет оказывать значительное влияние на заселенность ловушек различной глубины. В связи с этим, для увеличения степени заселенности ловушек, в особенности высокотемпературных, производилось заполнение их при охлаждении кристалла от 700 до 300°K (ср. кривые 3 и 4 на рис. 1 и кривые 2 и 5 на рис. 2).

Институт геологии Якутского филиала
Сибирского отделения Академии наук СССР
Якутск

Поступило
25 V 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Р. Бьюб, Фотопроводимость твердых тел, ИЛ, 1962. ² В. И. Трубин, П. И. Худаев, Сборн. Алмазы, 10, 1971, стр. 6. ³ П. Брайнлих, Сборн. Физика минералов, М., 1971, стр. 134.