

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

88-929

P13-88-929

В.В.Кушин\*, В.К.Ляпидевский\*,  
В.П.Перельгин, С.Г.Стеценко, Н.Б.Хохлов\*

ПРОЦЕССЫ В ТРЕКАХ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
В ПОЛИМЕРНЫХ ДЕТЕКТОРАХ

Направлено в журнал "Приборы и техника  
эксперимента"

---

\*Московский инженерно-физический институт

1988

Экспериментальные исследования отжига треков в диэлектрических трековых детекторах показали, что процессы регрессии в них носят многокомпонентный характер<sup>1/1</sup>. Энергии активации, соответствующие различным компонентам, могут существенно отличаться друг от друга, а соотношения между компонентами зависят от потерь энергии иона в детекторе. В данной работе многокомпонентный характер кривых отжига треков объясняется иначе, наличием двух типов рекомбинационных процессов. Показано, что такой подход позволяет достаточно хорошо описать имеющуюся совокупность экспериментальных данных по отжигу треков в полимерных детекторах.

## ТЕОРИЯ

Скорость травления  $V_B$  необлученного материала пропорциональна скорости химической реакции  $V_B \sim dC_B/dt$  и, согласно уравнению Аррениуса, равна:

$$V_B = A C_0 C_B \exp\left(-\frac{E_B}{kT_0}\right), \quad /1/$$

где  $C_B$  и  $C_0$  - концентрации молекул полимера и травителя соответственно,  $E_B$  - энергия активации при травлении,  $T_0$  - температура травления,  $A$  - константа. Скорость травления в треке  $V_T$  определяется изменением концентрации как поврежденных  $C_T$ , так и исходных  $C_B$  молекул. При этом, в предположении, что

$$C_B \gg C_T, \text{ скорость травления } V_T \sim \left(\frac{dC_B}{dt} + \frac{dC_T}{dt}\right). \text{ Выражение для}$$

скорости травления в треке можно записать следующим образом:

$$V_T = V_B + B C_0 C_T(T, t) \exp\left(-\frac{E_T}{kT_0}\right), \quad /2/$$

где  $E_T$  - энергия активации при травлении поврежденных молекул,  $B$  - константа. Заметим, что концентрация поврежденных молекул  $C_T(T, t)$  есть функция времени и температуры, при которой находится детектор как до, так и в процессе травления.

Можно полагать, не рассматривая в деталях природу радиационных дефектов /поврежденных молекул/, что  $C_T(T,t)$  описывается уравнениями рекомбинации. В треке существуют области с низкими значениями  $C_T$  на больших расстояниях от траектории частицы. В таких областях рекомбинация осуществляется по линейному закону  $dC_T/dt = \alpha C_T$ , где  $\alpha$  - коэффициент линейной рекомбинации. В этом случае:

$$C_T = N_\alpha e^{-\alpha t}, \quad /3/$$

где  $N_\alpha$  - начальная концентрация линейно рекомбинирующих дефектов. Наоборот, в области трека с большой плотностью потерянной энергии и высокой концентрацией дефектов происходит квадратичная рекомбинация по закону  $dC_T/dt = \beta C_T^2$ , где  $\beta$  - коэффициент квадратичной рекомбинации. В этом случае:

$$C_T = \frac{N_\beta}{1 + N_\beta \beta t}, \quad /4/$$

где  $N_\beta$  - начальная концентрация квадратично рекомбинирующих дефектов.

Очевидно, что наблюдаемая скорость травления в треке  $V_T$  определяется обоими процессами /линейной и квадратичной рекомбинацией/. Исходя из соотношений /2/, /3/, /4/, можно записать:

$$V_T(T,t) = V_B + VC_0 \exp\left(-\frac{E_T}{kT_0}\right) \left[ C_{10} e^{-\alpha t} + \frac{C_{20}}{1 + C_{20} \beta t} \right], \quad /5/$$

где коэффициенты  $C_{10}$  и  $C_{20}$  определяют вклад того или иного механизма рекомбинации и зависят от начальных концентраций  $N_\alpha$  и  $N_\beta$ .

Коэффициенты рекомбинации можно найти, если считать рекомбинацию как термическую активацию захваченных носителей заряда /2/

$$\alpha = S_\alpha \exp\left(-\frac{E_\alpha}{kT}\right), \quad /6/$$

$$\beta = S_\beta \exp\left(-\frac{E_\beta}{kT}\right),$$

где константы  $S_\alpha$  и  $S_\beta$  зависят от частотных факторов,  $E_\alpha$  и  $E_\beta$  - энергии активации. В общем случае возможен спектр энергетических состояний, отвечающих дефектам в треке /3/.

Очевидно, что процесс выявления треков травления возможен только в том случае, когда рекомбинация эффективно происходит при более высоких температурах, чем травление, поэтому  $C_T(T_0,t) = \text{const}$ . В частности, в полимерных детекторах рекомбинационные процессы эффективны при температурах  $100-130^\circ\text{C}^{1/4}$ , а обычные температуры травления:  $35-70^\circ\text{C}$ .

В работе проводилась экспериментальная проверка соотношений /1/-/6/, а также измерялись энергии активации и другие параметры, описывающие процессы в треке.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследовались полимерные детекторы из нитрата /Kodak LR-115/ и ацетата /Cellit-T/ целлюлозы. Детекторы облучались тяжелыми ионами на ускорителе У-300 и У-400 ОИЯИ альфа-частицами естественной радиоактивности, а также гамма-излучением /в том случае, когда исследовалось поведение детектора при больших плотностях поглощенной энергии/. Травление осуществлялось в 20%-растворе NaOH при различных температурах. Измерялись скорости травления  $V_T$  и  $V_B$  для различных температур отжига.

Энергии активации при травлении  $E_B$  и  $E_T$  определялись по наклону температурных зависимостей  $\ln V_B = f(T^{-1})$  и  $\ln(V_T - V_B) = f(T^{-1})$ . Измеренные значения для Kodak LR-115 составили:

$$E_B = /1,06 \pm 0,02/ \text{ эВ}; \quad E_T = /0,97 \pm 0,03/ \text{ эВ},$$

что согласуется с аналогичными данными для других типов нитрата целлюлозы /5/.

На рис.1 приведены зависимости  $(V_T - V_B)^{-1}$  от времени отжига в Kodak LR-115 для треков  $^{22}\text{Ne}$  с энергией 7 МэВ/нуклон. Как

видно из графиков, зависимости спрямляются при больших временах отжига. Такое поведение кривых объясняется тем, что линейная рекомбинация в треке завершается за меньшее время, и  $(V_T - V_B)^{-1}$ , согласно уравнению /5/, линейно зависит от времени.

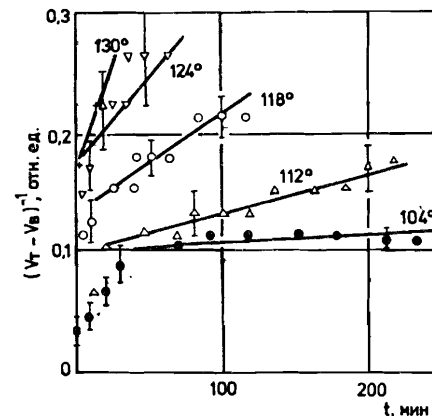


Рис.1. Зависимость разности  $(V_T - V_B)$  от времени отжига треков ионов  $^{22}\text{Ne}$  при различных температурах.

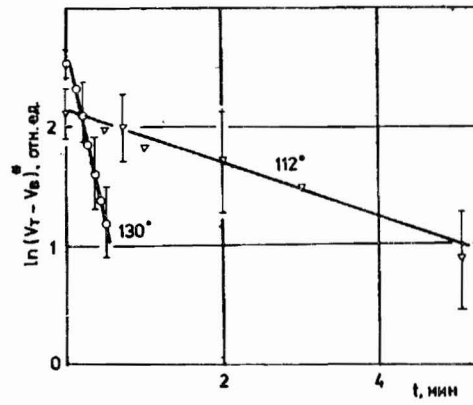
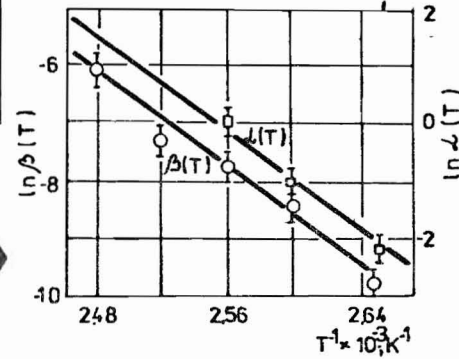


Рис.3. Зависимость констант рекомбинации от обратной температуры  $\alpha(T)$ ,  $\beta(T)$ .

Рис.2. Зависимость  $(V_T - V_B)$  от времени отжига при различных температурах.



Таким образом, имеется возможность разделить вклад квадратичной и линейной рекомбинационных составляющих. Наклон прямых на рис.1 пропорционален  $\beta(T)$ .

Константа линейной рекомбинации  $\alpha(T)$  определялась следующим образом. Из экспериментальных значений функции  $V_T - V_B$  вычиталось слагаемое /соотношение /5// с уже найденным значением  $\beta(T)$ . Тогда оставшаяся разность  $(V_T - V_B)^*$  соответствует линейной рекомбинационной составляющей. Эти данные приведены на рис.2. Действительно, функция  $(V_T - V_B)^*$  спрямляется в полулогарифмических координатах, что позволяет по наклону прямых определить коэффициенты рекомбинации  $\alpha(T)$  при различных температурах.

Зависимости  $\alpha(T)$  и  $\beta(T)$  приведены на рис.3. Видно, что эти зависимости хорошо описываются соотношениями /6/. Наклон прямых на рис.3 позволяет определить энергии активации при отжиге  $E_\alpha$  и  $E_\beta$ .

Полученные на основе экспериментальных результатов параметры сведены в таблицу.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Из таблицы видно, что энергии активации и константы  $S_\alpha$  и  $S_\beta$  для различных ионов имеют близкие значения. При обработке экспериментальных данных были сделаны также попытки их описания

Таблица

Детектор	Ион	Энергия, МэВ/нуклон	$(-dc/dx)$ , МэВ·см <sup>2</sup> /мг	$A_\alpha$	$A_\beta$	$\ln(S_\alpha)$ , отн.ед.	$\ln(S_\beta)$ , отн.ед.	$E_\alpha$ , эВ	$E_\beta$ , эВ
	<sup>4</sup> He	0,5	1,6	5,6	2,7	53,6	48,8	1,83	1,93
	<sup>14</sup> N	8	2,3	14,2	9,4	54,4	49,7	1,78	1,82
KODAK LR-155	<sup>22</sup> Ne	7	5,1	45,8	45,6	53,6	48,8	1,83	1,93
	<sup>58</sup> Ni	6	26,1	47,3	74,7	55,4	48,4	1,89	1,94
	Гамма	140	Мрад	A/A	2,4	5,41	47,2	1,98	1,66
CELLIT-T	<sup>22</sup> Ne	7	5,1	15,3	25,9	51,1	52,8	1,75	1,78

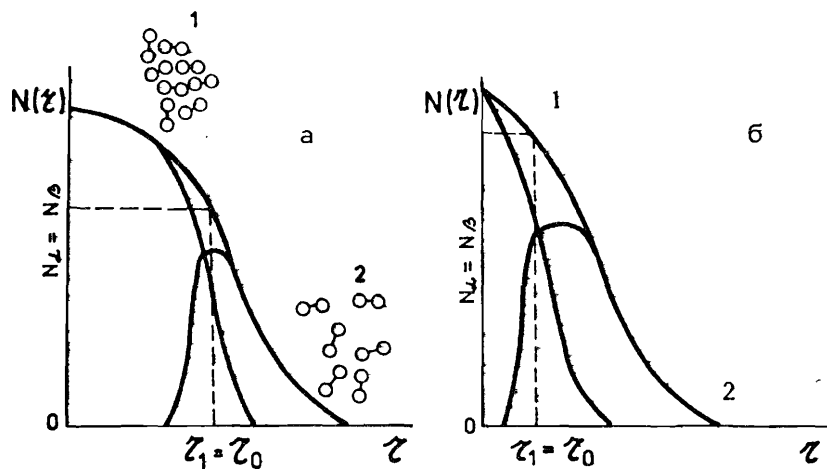


Рис.4. Пространственное распределение квадратично /1/ и линейно /2/ рекомбинирующих дефектов в треке легкого /а/ и тяжелого /б/ иона.

двухуровневой моделью, однако совпадения расчетных и экспериментальных значений достичь не удалось. Это свидетельствует о том, что радиационные дефекты, рекомбинирующие как по линейному, так и по квадратичному закону, имеют одинаковую физическую природу.

Отношение  $C_{10}/C_{20}$  падает с ростом  $d\epsilon/dx$ . Этот результат объясняется различием в структуре треков. Вероятность рекомбинации определяется расстоянием до ближайшего рекомбинационно-го партнера\*. Пусть  $r_1$  - среднее расстояние между отдельными генетическими связанными парами, а  $r_0$  - среднее расстояние между отдельными компонентами этих пар. Если  $r_1 > r_0$ , то наиболее вероятна рекомбинация генетически связанных пар, т.е. линейная рекомбинация. Этот случай реализуется в треках частиц с относительно малой ионизацией и малой объемной плотностью пар. Наоборот, при  $r_1 < r_0$  и больших  $d\epsilon/dx$  наиболее вероятна квадратичная рекомбинация.

\*Необходимо отметить, что природа дефектов, ответственных за образование трека и участвующих в рекомбинации, пока неизвестна. Это могут быть носители заряда /электроны и дырки/, радикалы и т.д. В дальнейшем будем их называть рекомбинационными парами.

Плотность поглощенной энергии в треке, а значит, и объемная плотность пар зависят от расстояния до траектории частицы. Поэтому можно предполагать, что в треке существуют области, где преобладает тот или иной тип рекомбинации. Квадратичная рекомбинация существенна вблизи траектории частицы, тогда как линейная рекомбинация наиболее вероятна на больших расстояниях от нее.

Рис.4 иллюстрирует распределение плотности рекомбинирующих пар по радиусу от траектории иона с малой и большой удельной ионизацией. Пунктиром отмечена условная граница, разделяющая области с линейной и квадратичной рекомбинацией. Из рис.4 видно возрастание доли квадратичной рекомбинации с увеличением удельной ионизации, что наблюдается в эксперименте.

## ВЫВОДЫ

Предложена модель для описания термического воздействия на треки заряженных частиц в полимерных детекторах. Проведено сравнение ее с экспериментальными результатами и показано их удовлетворительное совпадение. Помимо практического значения, разработанная модель позволяет исследовать механизм образования первичного трека и происходящие в нем процессы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гангрский Ю.П., Марков Б.Н., Перельгин В.П. - Регистрация и спектрометрия осколков деления. - М.Энергоиздат, 1981, с.144,
2. Радиационная химия макромолекул /Под. ред. М.Доула: /пер. с англ./ М.: Атомиздат, 1978.
3. Флейшер Р.Л., Прайс П.Б., Уокер Р.М. - Треки заряженных частиц в твердых телах /пер. с англ./ М.: Энергоиздат, 1984, ч.2, с.30.
4. Khan Hameed A., Hussan G. - Radiation effects, 1976, v.29, No.1, p.53.
5. Farid S.M., Sharma A.P. - 12-th Intern. conf. on SSNTD abstracts. Acapulco, G.R.O, Mexico, September 4-10, 1983, p.17.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 декабря 1988 года.