

07

## Оптически стимулированная люминесценция кристаллов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , облученных протонами

© А.В. Кружалов, И.И. Мильман, Ф.Г. Нешев, И.Г. Ревков

Уральский государственный технический университет, Екатеринбург

E-mail: igor.milman@dpt.ustu.ru

Поступило в Редакцию 10 января 2008 г.

Приведены результаты первых отечественных экспериментальных исследований оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ) образцов серийных термолюминесцентных (ТЛ) детекторов на основе анион-дефектного корунда, облученных протонами. Показаны принципиальная возможность комбинированного применения явлений ОСЛ и ТЛ для дозовой диагностики пучков ускоренных заряженных частиц и перспективность использования исследованных явлений в радиационной физике.

PACS: 29.40.Wk, 78.4545.+h, 78.60.Kn

Оптически стимулированная люминесценция (ОС) становится все более популярным методом твердотельной дозиметрии ионизирующих излучений, а ее физические и аппаратурные аспекты активно исследуются в зарубежных лабораториях [1].

Метод основан на оптической ионизации уровней захвата носителей заряда, заполненных при облучении ионизирующей радиацией, и регистрации вторичного оптического излучения, обусловленного рекомбинацией освобожденных носителей на излучательных центрах люминесценции. Выход ОСЛ оказывается пропорциональным поглощенной дозе излучения, плотности ионизации, создаваемой ионизирующим излучением, интенсивности и длине волны стимулирующего света. Отделение сигнала ОСЛ от возбуждающего света производят с помощью полосовых оптических фильтров или временной селекции, при которой сигнал ОСЛ регистрируется в интервалах между импульсами стимулирующего света. Основными преимуществами ОСЛ дозиметрии при сравнении ее с традиционной термолюминесцентной (ТЛД) считают более высокую чувствительность, быстрое считывание,

отсутствие необходимости нагрева детекторов и связанных с ним проблем.

Наилучшие результаты по применению ОСЛ получены с детекторами на основе анион-дефектного корунда. Материал этого детектора разработан в России для термолюминесцентной дозиметрии фотонного излучения и электронов и известен в иностранной и отечественной литературе как ТЛД — 500 К или  $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$ . В дальнейших исследованиях обнаружился ряд свойств, оптимально подходящих для использования этих же детекторов и в ОСЛ дозиметрии.

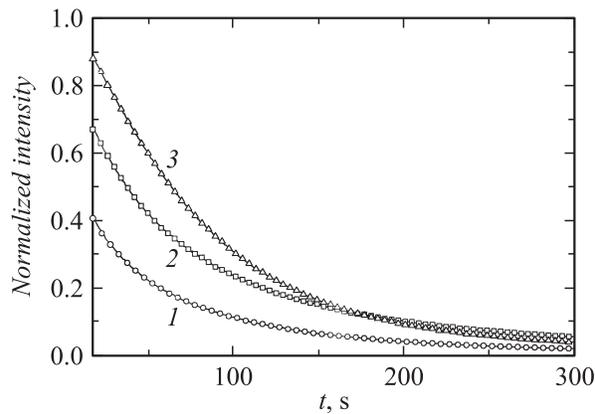
В зарубежной литературе имеются примеры применения метода ОСЛ в персональной дозиметрии [2], дозиметрии окружающей среды и космического пространства [3], для регистрации нейтронов [4], тяжелых заряженных частиц, ионов гелия, углерода, аргона [5]. Особое внимание уделяется проводимой методом ОСЛ дозиметрии высокоэнергетичных протонов [6], связанной с противораковой терапией и возможностью проводить локальные измерения небольшими по размеру детекторами *in vivo*, в том числе и в реальном времени [7]. В отечественной литературе сведения о подобных исследованиях отсутствуют.

В данной статье приводятся результаты исследования потенциальной возможности применения отечественных детекторов на основе  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$  и аппаратуры для дозиметрии протонов циклотронных энергий комбинированным методом ОСЛ и ТЛ.

Исследовались образцы стандартных детекторов ТЛД-500 К, разработанные в Уральском государственном техническом университете (УГТУ — УПИ) для термолюминесцентной дозиметрии (ТУ 2655-006-02069208-95), цилиндрической формы высотой 1 и диаметром 5 мм.

ОСЛ измерялась фотоэлектронным умножителем типа ФЭУ-142, максимум спектральной чувствительности фотокатода которого близок к спектральному составу люминесценции  $\text{F}^+$ -центров детекторов ТЛД-500 К (330–370 nm) [8].

Для отделения стимулирующего света с длиной волны 470 nm от излучения люминесценции между детектором и ФЭУ устанавливался стандартный стеклянный оптический фильтр УФС-2. Источником непрерывной оптической стимуляции служил светоизлучающий диод СДК-С469-5-10, снабженный линзой Френеля, обеспечивающий силу стимулирующего света 3500–5000 mcd с длиной волны излучения 470 nm, полушириной около 10 nm. ТЛ измерялась по стандартной методике, описанной в технических условиях на термолюминесцентный детектор ТЛД-500 К.



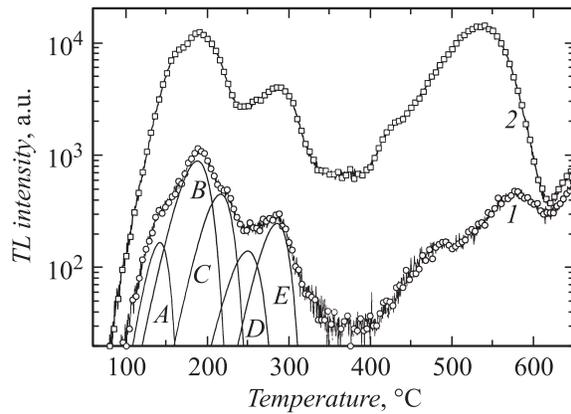
**Рис. 1.** Нормированные кривые затухания ОСЛ образцов детекторов ТЛД-500К, облученных протонами с флюенсом  $5 \cdot 10^{13}$  (1),  $1 \cdot 10^{14}$  (2) и  $5 \cdot 10^{14} \text{ c/m}^{-2}$  (3).

Облучение протонами с энергией около 6.7 MeV проводилось при комнатной температуре в исследовательском канале циклотрона Р-7 УГТУ-УПИ.

На рис. 1 приведены нормированные кривые затухания ОСЛ сигнала для трех образцов детекторов, облученных протонами с флюенсом  $5 \cdot 10^{13}$ ,  $1 \cdot 10^{14}$  и  $5 \cdot 10^{14} \text{ c/m}^{-2}$ . Выход ОСЛ, рассчитанный интегрированием кривых затухания за время 300 s, пропорционален дозе облучения.

Затухание интенсивности сигнала во времени описывается уравнением  $I(t) = A \exp(-t/\tau)$ , где  $A$  — начальная интенсивность в момент времени  $t = 0$ ,  $\tau$  — постоянная затухания. Анализ этих величин по данным рис. 1 показывает, что с ростом дозы величины  $A$  и  $\tau$  возрастают. Для кривых 1, 2, 3 рис. 1 величина  $\tau$  принимает значения 50, 64 и 78 s соответственно.

После регистрации ОСЛ без дополнительного возбуждения проводились измерения ТЛ этих же образцов. Оказалось, что ОСЛ считывание не является „обнуляющим“. На кривых термовысвечивания (КТВ) проявляются характерные пики (рис. 2): основной дозиметрический около 200°C; пик, связанный с присутствием следов ионов хрома в решетке оксида алюминия, около 300°C; высокотемпературные пики



**Рис. 2.** КТВ образцов детекторов ТЛД -500 К, облученных протонами с флюенсом  $5 \cdot 10^{13}$  (1) и  $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  (2) после измерения ОСЛ. Пики *A*, *B*, *C*, *D*, *E* — компоненты разложения основного ТЛ — дозиметрического пика кривой 1.

около 450, 500 и 550°C, природа которых неизвестна. Интенсивности ТЛ пиков отражают изменения дозы облучения.

Оказалось, что измерение ТЛ после ОСЛ позволило особенно четко обнаружить сложную структуру основного дозиметрического пика около 200°C. Как видно на рис. 2, на низкотемпературной стороне этого пика хорошо различимы перегибы, свидетельствующие о его неэлементарном строении. Разложение этого пика на элементарные составляющие в практически важном для ТЛ-дозиметрии интервале температур от комнатной до 350°C (рис. 2, кривые *A*, *B*, *C*, *D* и *E*) показывает присутствие спектра ловушек носителей заряда, освобождающихся при температурах 140°C (пик *A*), 186 (*B*), 215 (*C*), 248 (*D*), 284°C (*E*). Кинетические параметры элементарных ТЛ-пиков, полученных формальным разложением экспериментальных КТВ (температура максимума  $T_m$ , энергия активации  $E$ , предэкспоненциальный множитель  $S$  и концентрация захваченных носителей  $n_0$ ) на составляющие первого порядка [9] для образцов, облученных дозой  $5 \cdot 10^{13}$  и  $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , приведены в таблице.

Данные таблицы показывают, что увеличение дозы облучения не приводит к появлению новых пиков в разложении экспериментальных

Кинетические параметры ТЛ пиков *A, B, C, D, E*, полученных при разложении экспериментальных КТВ. Цифры у параметров соответствуют обозначениям КТВ рис. 2

Пик	$T_{1m}, ^\circ\text{C}$	$T_{2m}, ^\circ\text{C}$	$E_1, \text{eV}$	$E_2, \text{eV}$	$S_1$	$S_2$	$n_{10}$	$n_{20}$
<i>A</i>	140	154	1.234	1.337	$1.85 \cdot 10^{14}$	$9.69 \cdot 10^{14}$	$2.64 \cdot 10^3$	$3.81 \cdot 10^4$
<i>B</i>	186	178	1.08	0.998	$1.08 \cdot 10^{10}$	$1.54 \cdot 10^{10}$	$1.95 \cdot 10^3$	$1.72 \cdot 10^5$
<i>C</i>	215	206	1.284	1.207	$2.28 \cdot 10^{12}$	$6.13 \cdot 10^{11}$	$9.37 \cdot 10^3$	$1.97 \cdot 10^5$
<i>D</i>	248	247	1.355	1.651	$1.4 \cdot 10^{12}$	$1.35 \cdot 10^{15}$	$3.19 \cdot 10^3$	$2.23 \cdot 10^4$
<i>E</i>	284	286	1.749	1.113	$8.25 \cdot 10^{14}$	$8.69 \cdot 10^8$	$5.01 \cdot 10^3$	$1.24 \cdot 10^5$

КТВ. Для интерпретации существенных различий в значениях  $E$  и  $S$  для пиков  $D$  и  $E$  нужны дополнительные исследования. Как видно, увеличение дозы облучения приводит к повышению концентрации носителей ( $n_0$ ) во всех ловушках носителей заряда не равномерно. Наибольшим сечением захвата носителей заряда обладает ловушка, ответственная за ТЛ пик при 178–186°C, ее концентрация увеличилась в 88 раз, далее по убыванию сечения захвата следуют ловушки  $E(24)$ ,  $C(21)$ ,  $A(14)$  и  $D(7)$ .

Таким образом, в работе приведено экспериментальное доказательство принципиальной возможности дозовой диагностики пучков, ускоренных на циклотроне заряженных частиц комбинированными методами ОСЛ и ТЛ. Анализ абсолютных значений выхода ОСЛ и ТЛ показывает, что относительно измеренных в работе нижний предел регистрируемых доз может быть снижен на два–три порядка. Кроме того, облучение исследуемых образцов, характеризующихся высоким исходным уровнем концентрации атомных дефектов решетки — кислородных вакансий, сопровождалось ионолюминесценцией, спектральный состав которой, в комплексе с данными ОСЛ и ТЛ, будут использованы авторами при изучении закономерностей образования и эволюции радиационных дефектов в различных материалах при вариации в широких пределах энергий, типов и доз ускоренных ионов.

## Список литературы

- [1] Botter-Jensen L., McKeever S.W.S., Wintle A.G. // Optical stimulated luminescence dosimetry. Amsterdam: Elsevier, 2003.
- [2] www.lamdauer.com

- [3] *Kulharni M.S., Mishra D.R., Sharma D.N.* // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. 2007. doi: 10.1016/j. nimb. 2007.05.013.
- [4] *Mittani J.C.R., Silva A.A.R., Vanhavere F.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. 2007. doi: 10.1016/j. nimb. 2007.03.083. С. 1–9.
- [5] *McKeever S.W.S., Benton E.R., Gaza R.* et al // Book of Abstract 15th Intern. Conf. on Solid State Dosimetry. Delft, The Netherlands, July 8–13, 2007. С. 35.
- [6] *Edmund J.M., Anderson C.E., Greilich S.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. A. 2007. doi: 10.1016/j. nima. 2007.05.086. С. 1–4.
- [7] *Akselrod M.S., Botter-Jensen L., McKeever S.W.S.* // Radiation Measurements. 2007. doi:10.1016/j. radmeas. 2007.01.004. С. 211–254.
- [8] *Мильман И.И., Ревков И.Г., Моисейкин Е.В.* // Патент РФ. № 2310889. 2007.
- [9] *Pagonis V., Kitis G., Furetta C.* // Numerical and Practical Exercises in Thermoluminescence. USA: Springer, 2006.