

## ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИЕ КОМПОЗИТНЫЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ $Al_2O_3$ -BeO ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКИХ ДОЗ ГАММА- И ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

С.В. Никифоров, Д.В. Ананченко, Т.В. Штанг

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
ул. Мира 19, Екатеринбург 620002, Россия,  
s.v.nikiforov@urfu.ru, d.v.ananchenko@urfu.ru, t.v.shtang@urfu.ru

Исследованы дозовые характеристики термо- и оптически-стимулированной люминесценции (ТСЛ и ОСЛ) ультрадисперсных керамик  $Al_2O_3$ -BeO. Установлено, что дозовая зависимость ТСЛ образцов, облученных гамма-источником, близка к линейной в диапазоне 0.01-0.3 кГр. Для керамик, облученных импульсным электронным пучком (130 кэВ), близкая к линейной дозовая характеристика наблюдается для ОСЛ при дозах от 3 до 30 кГр. При этом величина ТСЛ фадинга составляет около 50% за 5 суток хранения в темноте и в дальнейшем не изменяется со временем. Установлено также, что фадинг облученных керамик очень сильно возрастает при наличии воздействия на них дневного света в процессе хранения. Полученные результаты доказывают перспективность керамик  $Al_2O_3$ -BeO для использования в качестве детекторов высоких доз гамма- и импульсных электронных излучений.

**Ключевые слова:** оксидные керамики; высокодозное облучение; термостимулированная люминесценция; оптически-стимулированная люминесценция; люминесцентные детекторы.

## LUMINESCENT COMPOSITE CERAMICS BASED ON $Al_2O_3$ -BeO FOR MEASURING HIGH DOSES OF GAMMA AND ELECTRON RADIATION

Sergey Nikiforov, Daria Ananchenko, Tatiana Shtang

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
19 Mira Str., 620002 Yekaterinburg, Russia,  
s.v.nikiforov@urfu.ru, d.v.ananchenko@urfu.ru, t.v.shtang@urfu.ru

The dose characteristics of thermally and optically stimulated luminescence (TSL and OSL) of ultrafine  $Al_2O_3$ -BeO ceramics were studied. It was found that the dose dependence of TSL for samples irradiated with a gamma source is close to linear in the range of 0.01-0.3 kGy. For ceramics irradiated with a pulsed electron beam (130 keV), a dose characteristic close to linear is observed for OSL at doses from 3 to 30 kGy. In this case, the value of TSL fading is about 50% after 5 days of storage in the dark and does not change with time. It was also found that the fading of irradiated ceramics increases greatly when exposed to daylight during storage. The results prove the promise of  $Al_2O_3$ -BeO ceramics for use as detectors of high doses of gamma and pulsed electron radiation.

**Keywords:** oxide ceramics; high-dose irradiation; thermally stimulated luminescence; optically stimulated luminescence; luminescence detectors.

### Введение

В настоящее время высокие дозы ионизирующих излучений (10-100 Гр и более) широко применяются в радиационных технологиях и научных исследованиях [1]. В связи с этим возникает задача оценки дозы, поглощенной в облучаемом материале. Существующие коммерческие люминесцентные дозиметры имеют ограничение по диапазону измеряемых доз в области высоких значений (не более 10 Гр). Перспектив-

ными материалами для люминесцентной дозиметрии высоких доз являются наноструктурные керамики с размером кристаллитов 10-100 нм, обладающие повышенной радиационной стойкостью [2]. Ранее в Уральском федеральном университете были синтезированы ультрадисперсные композитные керамики на основе  $Al_2O_3$ -BeO [3]. Установлено, что они характеризуются наличием интенсивного изолированного пика ТСЛ при 525 К [3].

Вместе с тем, недостаточно изучены такие важные дозиметрические характеристики указанных керамик, как дозовая зависимость люминесцентного отклика и фединг, характеризующий потери дозиметрической информации при хранении детектора.

Целью данной работы являлось исследование дозиметрических характеристик керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-BeO}$ , облученных высокими дозами гамма- и электронного излучений.

### Материалы и методы исследования

Методика синтеза образцов не отличалась от описанной ранее [3]. В качестве исходного материала использовался нанопорошок  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , полученный плазмохимическим методом (компания «Плазмотерм», Россия), с размером частиц 75-200 нм. Нанопорошки подвергались холодному одноосному прессованию с давлением 100 МПа. Полученные компакты имели диаметр 5 мм и толщину 1 мм. Керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-BeO}$  были синтезированы в результате высокотемпературной обработки (1400 °C) компактов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в течение 4 часов в электровакуумной печи в тиглях из BeO в присутствии углерода для создания восстановительных условий. Данные условия необходимы для образования в исследуемых образцах кислородных вакансий, являющихся эффективными центрами захвата и рекомбинации в оксидных материалах [4].

Образцы керамик облучались при комнатной температуре гамма-источником на основе  $^{60}\text{Co}$  и импульсным электронным пучком ускорителя РАДАН-ЭКСПЕРТ (130 кэВ, 60 А/см<sup>2</sup>, 2 нс). ТСЛ измерялась при скорости линейного нагрева 2 К/с с помощью ФЭУ-142. Для измерения ОСЛ образцы облучались светодиодом с длиной волны 470 нм. ОСЛ регистрировалась в режиме непрерывного возбуждения с помощью ФЭУ «Hamamatsu 10722-210». Для исключения попадания излучения светодиода на ФЭУ перед ним устанавливался фильтр, поглощающий свет с длинами волн 400-600 нм.

### Результаты и их обсуждение

Дозовая зависимость интенсивности ТСЛ дозиметрического пика при 525 К в образцах, облученных гамма-источником, представлена на рис. 1 (кривая 1). Видно, что эта зависимость близка к линейной при изменении дозы в пределах 0.01-0.3 кГр. Коэффициент нелинейности, определяемый как угол наклона дозовой характеристики, построенной в двойных логарифмических координатах, составил  $k=0.96$ . Однако для керамики, облученной импульсным электронным пучком, дозовая зависимость ТСЛ оказалась существенно нелинейной, и ее использование в качестве ТСЛ детектора затруднительно. При этом дозовая зависимость ОСЛ в керамике, облученной импульсным электронным пучком, оказалась близкой к линейной в диапазоне 3-30 кГр ( $k = 0.94$ ) (рис. 1, кривая 2).

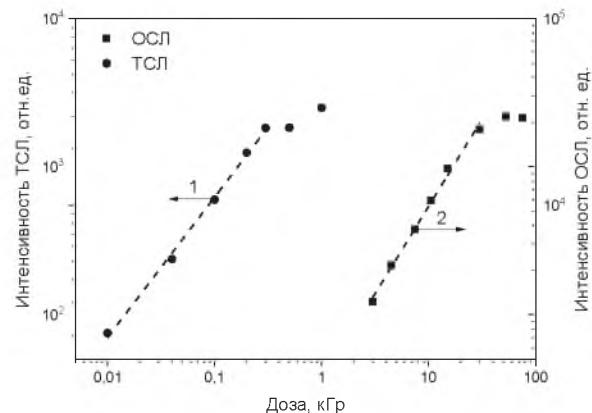


Рис. 1. Дозовые зависимости интенсивности ТСЛ керамик, облученных гамма-источником (1), и ОСЛ образцов после облучения импульсным электронным пучком (2)

Для исследования фединга образцы керамик после облучения импульсным электронным пучком (15 кГр) выдерживались в темноте при комнатной температуре в течение определенного времени. Величина фединга оценивалась по относительному уменьшению интенсивности пика ТСЛ при 525 К. Часть образцов после облучения не помещалась в темное место, а выдерживалась при естественном освещении в лабораторных условиях. Полученные результаты сравнивались с федингом образцов, хранимых в отсутствие воздействия света.

На рис. 2 представлены зависимости нормированной интенсивности ТСЛ пика при 525 К от времени хранения образцов в темноте. Видно, что в течение первых 120 часов хранения интенсивность ТСЛ уменьшается примерно в 2 раза, что соответствует величине фединга 50%.

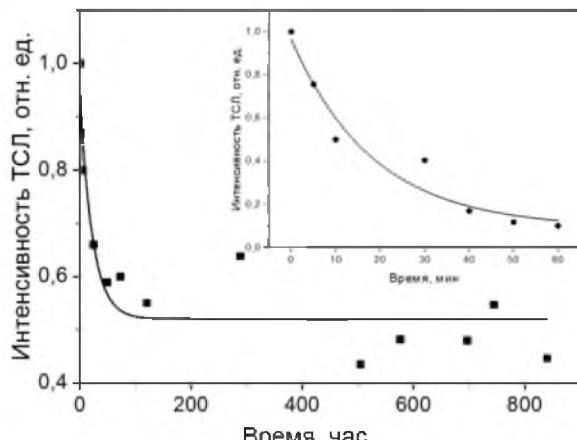


Рис. 2. Зависимость нормированной интенсивности ТСЛ облученных керамик от времени хранения в темноте. На вставке – та же зависимость при хранении образцов при наличии воздействия дневного света

Однако при дальнейшем увеличении времени хранения от 120 до 840 часов интенсивность ТСЛ не претерпевает заметных изменений в пределах ошибки эксперимента, обусловленной разбросом люминесцентного отклика различных образцов и погрешностью обеспечения дозы ускорителем электронов.

В отличие от образцов, хранимых в темноте, интенсивность ТСЛ керамик, подвергаемых в процессе хранения неконтролируемому воздействию дневного света, уменьшается на 90% в течение 60 минут (вставка рис. 2). Данный результат свидетельствует о высоком значении сечения фотоионизации дозиметрических ловушек. Ранее [5] было обнаружено, что оптическое возбуждение исследуемых керамик при 470 нм вызывает опустошение ловушек, связанных с пиком при 525 К, что

приводит к эффекту оптического обесцвечивания ТСЛ. Однако, как показано в этой же работе [5], эти же ловушки обусловливают появление ОСЛ в исследуемых образцах. Поэтому их чувствительность к дневному свету нельзя однозначно считать нежелательным эффектом.

### Заключение

Присутствие линейных участков дозовых характеристик керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-BeO}$  доказывает их перспективность для использования в качестве детекторов высоких доз гамма- и импульсных электронных излучений, основанных на эффектах ТСЛ и ОСЛ. Однако при этом требуется введение поправок на величину фединга и минимизация воздействия света при хранении образцов в течение времени от окончания облучения до считывания дозиметрической информации.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FEUZ-2023-0014).

### Библиографические ссылки

1. Ободовский И.М. Радиационные технологии. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект»; 2015. 296 с.
2. Kortov V.S. Nanophosphors and outlooks for their use in ionizing radiation detection. *Radiation Measurements* 2010; 45: 512-515.
3. Nikiforov S.V., Avdyushin I.G., Ananchenko D.V., Kiryakov A.N., Nikiforov A.F. Thermoluminescence of new  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-BeO}$  ceramics after exposure to high radiation doses. *Applied Radiation and Isotopes* 2018; 141: 15-20.
4. Evans B.D., Pogatshnik G.J., Chen Y. Optical properties of lattice defects in  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 1994; 91: 258-262.
5. Никифоров С.В., Борбалин А.Д., Марфин А.Ю., Никифоров А.Ф. Оптически индуцированные эффекты в облученных ультрадисперсных керамиках  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-BeO}$ . *Письма в журнал технической физики* 2019; 45(21): 15-18.