

05;07;12

## Кинетика люминесценции кварцевых стекол при облучении протонами

© П.В. Деменков, О.А. Плаксин, В.А. Степанов,  
П.А. Степанов, В.М. Чернов

ГНЦ РФ Физико-энергетический институт, Обнинск

Поступило в Редакцию 10 января 2000 г.

Экспериментально показано, что интенсивность радиационно-индуцированной люминесценции (РИЛ) кварцевых стекол КУ-1 и КИ в полосе при 450 nm в процессе облучения протонами (энергия 8 MeV, мощность дозы  $5 \cdot 10^3$  Gy/s, доза до  $1.2 \cdot 10^7$  Gy) увеличивается более чем в 10 раз при дозе  $10^6$  Gy. При дозе выше  $10^6$  Gy спектральная эффективность преобразования энергии ионизирующего излучения в максимуме полосы РИЛ при 450 nm для всех исследованных типов стекол достигала  $\sim 10^{-6} \text{ nm}^{-1}$ . После предварительного низкоинтенсивного (до 0.5 Gy/s)  $\gamma$ -облучения интенсивность РИЛ в начале протонного облучения и ее изменение с дозой зависят от содержания примесей в кварцевых стеклах. Рост интенсивности РИЛ зависит от процессов образования положительно и отрицательно заряженных микроскопических областей в стеклах.

При радиационных воздействиях в широкозонных диэлектриках происходит перезарядка электрон-дырочных центров радиационными носителями заряда, которая, как правило, сопровождается радиационно-индуцированной люминесценцией (РИЛ) [1,2]. По изменениям абсолютной и относительной интенсивности полос в спектрах РИЛ с ростом дозы облучения можно судить о механизмах и кинетике формирования оптически активных центров в материалах. В данной работе исследовали кинетику РИЛ кварцевых стекол в условиях облучения протонами (энергия 8 MeV, мощность дозы  $5 \cdot 10^3$  Gy/s) при комнатной температуре.

Спектры радиационно-индуцированной люминесценции (РИЛ) кварцевых стекол состоят из трех широких полос с максимумами около 300, 450 и 645 nm [3]. Полосу люминесценции при 450 nm обычно связывают с кислородно-дефицитным центром ( $\equiv \text{Si} - \text{Si} \equiv$ ), а полосу люминесценции при 645 nm — с дырочными центрами на нестиковом кислороде ( $\equiv \text{Si}-\text{O}$ ) [1,3,4]. Изменение интенсивности РИЛ в процессе облучения

Химический состав стекол

Стекло	Примеси металлов (at.%)	ОН-группы, at.%
КУ-1	Al, Fe, Na (< 0.001)	$4 \cdot 10^{-2}$
КИ (1)	Co, Fe, Mn (< 0.1)	$2-4 \cdot 10^{-4}$
КИ (2)	Zr(0.49), Sr(0.021), As(0.005), Mo(0.06), Ba(0.9)	$2-4 \cdot 10^{-4}$

протонами регистрировали в максимуме наиболее интенсивной полосы люминесценции при 450 nm. Были использованы кварцевые стекла КУ-1 и два вида стекла КИ, химический состав которых приведен в таблице.

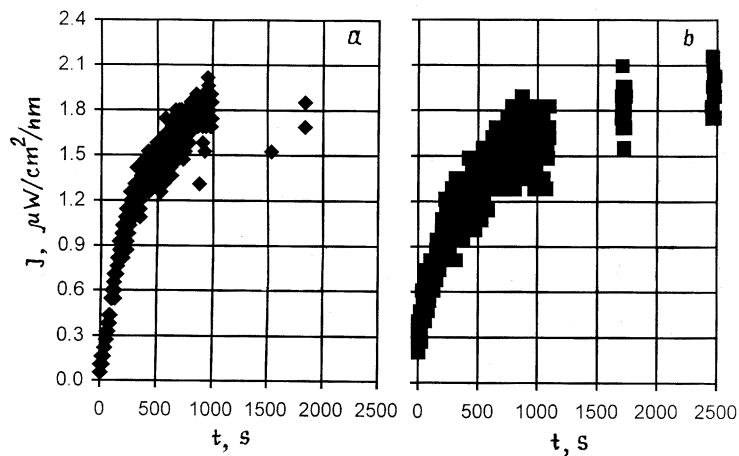
В стеклах КУ-1 и КИ (1) с ростом дозы облучения происходило увеличение интенсивности РИЛ приблизительно до одного уровня с характерным временем 500–1000 s (рис. 1). К концу облучения (доза  $\sim 10^7$  Gy) зафиксировано увеличение интенсивности РИЛ относительно ее начального значения в  $\sim 20$  (для КУ-1) и в  $\sim 10$  (для КИ (1)) раз. При дозе выше  $10^6$  Gy спектр РИЛ стекол соответствовал известным литературным данным [3].

Концентрацию заполненных в процессе облучения не взаимодействующих электрон-дырочных ловушек  $N_{if}$  можно оценить из соотношения

$$N_{if} = \frac{\rho \dot{D} \tau}{E_{e-h}},$$

где  $\dot{D}$  — мощность дозы ( $5 \cdot 10^3$  Gy/s),  $\rho$  — плотность материала ( $2.23$  g/cm<sup>2</sup>),  $E_{e-h}$  — энергия образования электрон-дырочной пары ( $\sim 2 \div 2.5E_g$ ),  $E_g$  — ширина запрещенной зоны  $\sim 9$  eV [1]. Если характерное время увеличения интенсивности РИЛ ( $\sim 10^3$  s) принять в качестве характерного времени  $\tau$  перезарядки системы ловушек, то получаемое значение  $N_{if} \sim 10^{21} - 10^{22}$  cm<sup>-3</sup> оказывается физически не реальным.

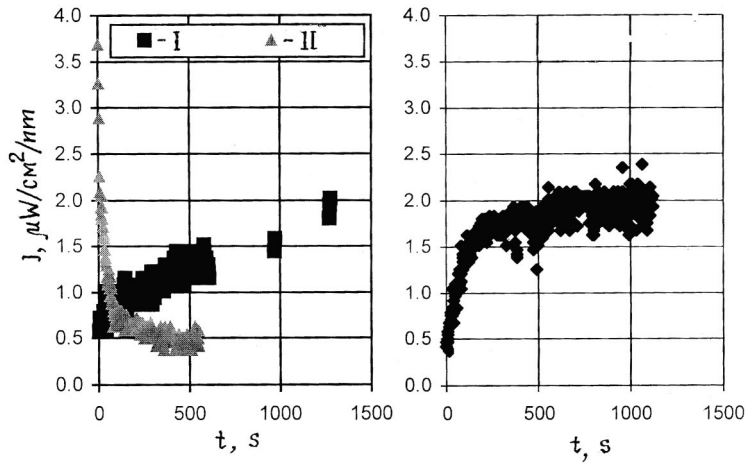
Более вероятна связь изменений РИЛ с процессами перераспределения заполненных электрон-дырочных ловушек в объеме стекол. На примере материалов из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> было показано [5], что особенности РИЛ широкозонных диэлектриков связаны с возникновением в объеме материала заряженных микрообластей, которые влияют на зарядовое состояние оптически активных центров. В частности, рост интенсивности



**Рис. 1.** Временная зависимость спектральной интенсивности РИЛ (длина волны 450 nm) кварцевых стекол при облучении протонами: *a* — КУ-1, *b* — КИ (1).

РИЛ в полосе *F*-центров (415 nm) связан с образованием отрицательно заряженных областей (избыток отрицательно заряженных ловушек) в монокристалле  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при облучении протонами (энергия 8 MeV, мощность дозы  $5 \cdot 10^3$  Gy/s), а отрицательное зарядение границ относительно объема зерен в керамике  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$  проявлялось в увеличении интенсивности полосы РИЛ ионов  $\text{Cr}^{3+}$  (690 nm). Можно полагать, что рост интенсивности РИЛ кварцевых стекол также обусловлен образованием положительно и отрицательно заряженных микрообластей в материале. По-видимому, такое неоднородное распределение электрического заряда в стеклах может сохраняться длительное время после облучения. При повторной регистрации РИЛ облученного образца (через 2 недели) в начале облучения наблюдалась интенсивная РИЛ с последующим незначительным ростом ее интенсивности с таким же, как и ранее, характерным временем 500–1000 s.

В условиях низкоинтенсивного облучения характер распределения заряженных электрон-дырочных ловушек по объему в значительной степени зависит от содержания примесей в стеклах. В стекле КИ (1), в отличие от стекла КИ (2) и КУ-1, после  $\gamma$ -облучения (источник  $\text{Co}^{60}$ , мощность дозы до 0.5 Gy/s) с дозой  $10^4$  Gy возникает оптически



**Рис. 2.** Временная зависимость спектральной интенсивности РИЛ (длина волны 450 nm) гамма-облученных кварцевых стекол при облучении протонами: *a* — I — КИ (1) и II — КИ (2), *b* — КУ-1.

неоднородное состояние и визуально различаются хлопьевидные темные области с характерным размером  $\sim 1$  mm.

В кварцевых стеклах после предварительного  $\gamma$ -облучения обнаруживается интенсивная РИЛ с начала облучения протонами (рис. 2). Стекла КУ-1 и КИ (1, 2) были подвергнуты  $\gamma$ -облучению с дозами  $10^8$  и  $10^4$  Gy и выдержаны при комнатной температуре в течение 1 года и 4 лет соответственно. Интенсивность РИЛ  $\gamma$ -облученных стекол КУ-1 (доза  $10^8$  Gy) и КИ (1) (доза  $10^4$  Gy) с ростом дозы протонного облучения увеличивается до уровня интенсивности РИЛ, не подвергавшихся  $\gamma$ -облучению стекол. Характерное время изменения интенсивности РИЛ для  $\gamma$ -облученного стекла КУ-1 в сравнении с предварительно необлученным стеклом заметно меньше. В  $\gamma$ -облученном стекле КИ (2) (доза  $10^4$  Gy), напротив, происходит резкое снижение интенсивности РИЛ (приблизительно в 8 раз) с характерным временем  $\sim 100$  s. Таким образом, предварительное низкоинтенсивное (до 0.5 Gy/s)  $\gamma$ -облучение выявляет зависимость интенсивности и кинетики РИЛ от содержания примесей в стеклах.

## Список литературы

- [1] *Criscom D.L.* // Journal of Ceramic Society of Japan. 1991. V. 99. P. 923.
- [2] *Chernov V.M.* et al. // Journal of Nuclear Materials. 1998. V. 253. P. 175.
- [3] *Калантарьян В.* и др. // Труды Междунар. конфер. по радиационному материаловедению. ХФТИ. 1991. Т. 9. С. 142.
- [4] *Tohmon R.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 62. N 12. P. 1388.
- [5] *Plaksin O.A.* et al. // Journal of Nuclear Materials. 1999. V. 271–272. P. 496.